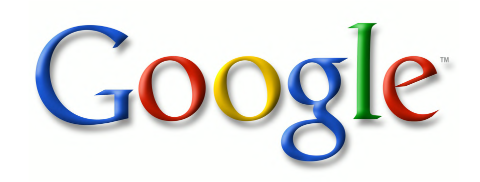


GRANDES VOÛTES

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME IV

2ME PARTIE — VOÛTES ARTICULÉES

BOURGES
IMPRIMERIE Vve TARDY-PIGELET ET FILS
15, RUE JOYEUSE, 15
—
1913

AVERTISSEMENT[1]

DIVISIONS DE L'OUVRAGE

CLASSEMENT DES PONTS EN SÉRIES ET DANS CHAQUE SÉRIE PAR DATE

TABLEAUX SYNOPTIQUES — MONOGRAPHIES

SUITE, DANS CHAQUE MONOGRAPHIE,

DE FIGURES, PLANCHES. PHOTOGRAPHIES, RENVOIS, SOURCES.

DÉSIGNATION ABRÉGÉE DES MATÉRIAUX

UNITÉS AUXQUELLES ON RAPPORTE LES QUANTITÉS ET DÉPENSES

1. Divisions de l'ouvrage. — Cet ouvrage est ainsi divisé :

1re Partie : Voûtes inarticulées[2]. — Ce sont les voûtes ordinaires, ainsi qualifiées par opposition aux voûtes articulées.

2e Partie : Voûtes articulées.

3e Partie : Ce que l'expérience enseigne de commun à toutes les voûtes.

Appendice : Pratique des voûtes. — Instructions pour projeter et construire. — Ouvrages courants, Viaducs..... — Répertoires. — Tables numériques.....

Dans les 1re et 2e Parties, sont décrits les ponts qui ont — ou qui avaient — des voûtes de 40m et plus de portée.

2. Classement des Ponts en séries. — J'ai classé par intrados les voûtes inarticulées, par type d'articulation les voûtes articulées.

Ce classement sera détaillé et justifié plus loin.

3. Classement dans chaque série par date d'exécution. — Dans chaque série, les ouvrages sont classés par date. On voit ainsi ce qui, dans un pont, est emprunté à un plus ancien.

4. Tableaux synoptiques. — Monographies. — Les dispositions comparables des ouvrages d'une série sont rapprochées dans des tableaux synoptiques : ainsi groupées elles instruisent.

1. — donné en tête des Tomes I, II, III.

2. — On les a quelquefois dites « encastrées » : à proprement parler, elles ne le sont pas. En histoire naturelle, ce qui n'a pas d'articulation est justement qualifié « inarticulé ».

Viennent ensuite les monographies de chaque ouvrage : on y trouvera ce qui lui est spécial, description, histoire, dessins, photographies.

Pour tous les ponts, on a donné une élévation à la même échelle, 2^{mm}, de l'arche ou des arches de 40^{m} et plus.

Autant qu'on l'a pu, en restant clair, on n'a donné qu'une seule fois chaque indication, soit dans les tableaux synoptiques, soit dans la monographie, soit dans les dessins.

5. Suite, dans chaque monographie, de figures, planches, photographies, renvois, sources. — Chaque ouvrage a sa suite :

de figures : f_1 f_2..... ;
de planches : Pl_1 Pl_2..... ;
de photographies : Φ_1 Φ_2..... ;
de renvois au bas des pages : ^{1}, ^{2}..... ;
de sources : S_1, S_2.... indiquées à la fin de chaque monographie, quelquefois subdivisées : S'_1, S''_1.....[3].

6. Désignation abrégée des matériaux aux tableaux synoptiques et aux dessins.

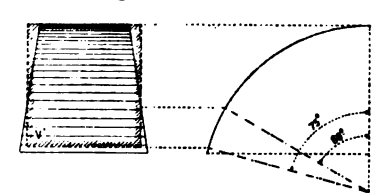
Béton					B
Moellons ordinaires		employés en blocage sans préparation spéciale			MO
Moellons ordinaires		choisis (c'est-à-dire avec sujétion)	employés en parement	à joints incertains	MOI
Moellons ordinaires		choisis (c'est-à-dire avec sujétion)	employés en parement	grossièrement disposés par assises horizontales.	MOH
Moellons ordinaires		choisis (c'est-à-dire avec sujétion)	employés en voûte	méplats, lités, prolongeant, soit chaque lit de douelle, soit un lit sur 2, sur 3.	MOV
Moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan	Moellons équarris[4]	»			ME
Moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan	Moellons équarris[4]	taillés en voussoirs, lits pleins prolongeant exactement ceux de douelle. Joints et face de queue en partie pleins.			MEV
Moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan	Moellons d'appareil[5]	Dimensions imposées	»		MA
Moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan	Moellons d'appareil[5]	Dimensions imposées	taillés en voussoirs, lits et joints pleins.		MAV
Libages		Pierre de taille de grand appareil grossièrement équarrie.			L
Pierre de taille		Blocs appareillés sur les 6 faces. Toutes les dimensions imposées.			PT
Briques					Br

3. — On peut ainsi contrôler et apprécier les renseignements donnés.
4. — Synonyme : Moellons têtués.
5. — Synonyme : Moellons smillés.

7. Unités adoptées pour comparer les quantités et dépenses.

A. — Cintres. — Dans la colonne 14 des Tableaux synoptiques, on a rapporté le cube de bois, le poids de fer et la dépense, au mètre carré de douelle d'une voûte V' à tympans verticaux, exigeant le même cintre.

La largeur uniforme de V' est celle de la voûte considérée :



au joint à 60° de la verticale pour les pleins cintres, les ellipses et les arcs de plus de 120° ;

aux naissances, pour les arcs de moins de 120° ;

c'est-à-dire, pour toutes les voûtes, au joint à partir duquel les voussoirs cessent de pouvoir être soutenus en faisant simplement déborder les couchis.

Comme il convient que les vaux se prolongent jusqu'à l'angle de 75°, on a pris pour surface de douelle celle de la voûte théorique V' :

à partir des angles de 75° pour les ellipses, pleins cintres, arcs de cercle de plus de 150° ;

à partir des naissances pour les arcs de cercle surbaissés de moins de 150°.

B. — Ouvrage. — La surface offerte à la circulation, S_p est le produit :

$$S_p = \begin{pmatrix}\text{Longueur totale entre les abouts} \\ \text{des parapets donnée colonne 2}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\text{Largeur disponible entre parapets} \\ \text{donnée colonne 3}\end{pmatrix}$$

S_p mesure l'utilité de l'ouvrage.

Soit S_e la surface vue d'élévation entre la voie portée, les murs en aile ou quarts de cône et le terrain naturel ;

Je considère le volume $W = S_e \times$ (Largeur disponible entre parapets).

C'est le volume d'un mur plein ayant même surface d'élévation vue et même largeur utile que l'ouvrage. — Convenons de l'appeler le volume « utile ».

Soient Q et D le cube de maçonnerie de l'ouvrage et sa dépense.

$Q : S_p$ est le cube de maçonnerie à mortier par m. q. de surface horizontale utile. C'est l'épaisseur d'une dalle en maçonnerie de même cube que l'ouvrage et qui aurait même longueur et même largeur utile.

$Q : W$ est le cube de maçonnerie à mortier, par m. c. de volume « utile ».

$D : S_p$ est le prix du m. q. de surface offerte à la circulation.

$D : W$ est le prix du m. c. de volume « utile ».

Toutes ces quantités sont données à la colonne 18 des Tableaux synoptiques.

Quand les fondations sont très au-dessus de la vallée, on a donné de plus les rapports $Q : W'$, $D : W'$.

$W' = (S'_e$, Surface d'élévation au-dessus des fondations$) \times$ (Largeur disponible entre parapets).

W' est le volume « utile » au-dessus des fondations.

2e PARTIE

VOÛTES ARTICULÉES

LIVRE I

POURQUOI ET COMMENT
ON A ARTICULÉ DES VOÛTES

LIVRE II

DESCRIPTION DES PONTS
QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES ARTICULÉES
DE 40^m^ ET PLUS DE PORTÉE

LIVRE III

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE
DE SPÉCIAL AUX VOÛTES ARTICULÉES

INTRODUCTION

A L'ÉTUDE DES VOÛTES ARTICULÉES

En 1870, Dupuit proposa, le premier, d'articuler les voûtes.

De cette idée française, on a en France peu ou mal parlé : on ne l'y applique point. Mais, en Allemagne, on l'a fort bien accueillie : depuis quelque 30 ans, on y articule des voûtes.

Dans les voûtes articulées, on est sûr des efforts : on y peut faire plus et mieux travailler les matériaux.

Plus souples, elles se prêtent, sans fissures, à des mouvements qui troublent les autres. Il convient vraiment d'articuler les voûtes dont les appuis peuvent reculer, s'enfoncer inégalement.

On construit de plus en plus en béton : à peine de fissures graves, il est prudent d'articuler aussi les grandes voûtes plates en béton.

Il faut donc étudier les voûtes articulées : elles le méritent.

Au livre I, on indique pourquoi et comment on a articulé des voûtes ; au livre II, on décrit les grandes voûtes articulées ; au livre III, on conclut.

LIVRE I

POURQUOI ET COMMENT ON A ARTICULÉ DES VOÛTES

TYPES D'ARTICULATIONS

PRINCIPES. — FORMULES. — EXPÉRIENCES

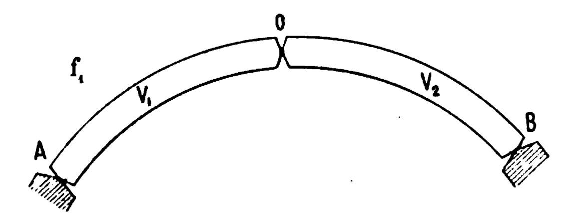
HISTORIQUE

CLASSEMENT DES VOÛTES ARTICULÉES

TITRE I

POURQUOI ON A ARTICULÉ DES VOÛTES

Dans une voûte articulée aux trois [1] points A, O, B (f_1), toute courbe de pression passe par A, O, B : avec la simple Statique, on a les efforts.



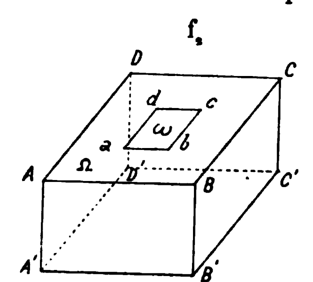
Si la voûte tasse, si les appuis reculent ou s'enfoncent, les deux demi-voûtes V_1, V_2 tournent, sans se fendre, autour de leurs articulations.

La voûte se calcule mieux et plus vite qu'inarticulée ; elle est plus souple.

TITRE II

PROPRIÉTÉ DE LA MATIÈRE QUI PERMET LES ARTICULATIONS

Considérons un prisme A B C D, A' B' C' D' (f_2).



Soient :

Ω la surface A B C D,

ξ_Ω l'effort par $\overline{0^m01}^2$ qui, uniformément distribué sur Ω, écrase le solide,

β_Ω la limite de travail permis sur Ω.

Découpons sur Ω un petit rectangle *abcd* de surface ω.

L'expérience montre que, pour écraser le solide, il faut appliquer sur ω un effort par $\overline{0^m01}^2$ ξ_ω supérieur à ξ_Ω. On y pourra donc accepter un travail β_ω supérieur à β_Ω.

1. — Les voûtes en maçonnerie, articulées, ont toujours trois articulations.

Quelques voûtes, mais en béton armé, en ont :
deux (Ludwigsbrücke sur la Schwabach, à Erlangen, portée entre rotules, 23m30, surbaissement 1/11) ;
une (Pont de Payerbach sur le Schwarzafluss, portée 26m, flèche 1m80).

C. Kersten. — « *Brücken in Eisenbeton* » Teil II : « *Bogenbrücken* ». — Berlin 1910, pages 153, 159.

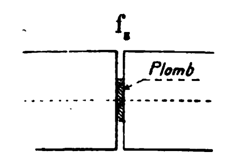
L'expérience [2, 3] n'a pas dégagé de relation nette entre $\frac{\xi_\omega}{\xi_\Omega}$ et $\frac{\omega}{\Omega}$.

TITRE III

COMMENT ON A ARTICULÉ LES VOÛTES : QUATRE TYPES D'ARTICULATIONS

CHAPITRE I

ARTICULATIONS SUR PLOMB



§ 1. — *PRINCIPE*

Des bandes de plomb occupent la partie centrale des joints de clef et de retombées (f_3).

§ 2. — *PROPRIÉTÉS DU PLOMB*

Sous une charge croissante, le plomb, à partir d'une certaine limite, coule, s'étale, mais sans perdre sa cohésion. Son épaisseur diminue, sa section aug-

2. — Expériences de M. Durand-Claye sur des cubes de 10^{cm} pressés par une plaque carrée, en pierres s'écrasant : les unes à 84^k, les autres à 576^k.
Annales des Ponts et Chaussées, 1887, - août - p. 230, M. Flamant.

Expériences de M. Bauschinger sur des cubes d'un grès s'écrasant à $685^k/\overline{0^m01}^2$, pressés par une plaque carrée d'acier de côté z variable (f_3).

Dimensions des blocs *(en 0m01)*			Côté de la plaque d'acier *(en 0m01)*	Effort en kg/$\overline{0^m01}^2$ sous la plaque d'acier au moment de la rupture	*Rapports*	
a	b	h	z	$\xi_\omega = \frac{P}{z^2}$	$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{z^2}{ab}$	$\frac{\xi_\omega}{\xi_\Omega = 685^k}$
10^c	9^{c}9	9^{c}65	3^{c}9	1052^k	*0,154*	*1,536*
9.85	9.9	9.70	5.7	923	*0,333*	*1,347*
10	9.85	9.70	7.8	772	*0,618*	*1,127*

« *Mitteilung des mech. tech. Laboratoriums der Technischen Hochschule in München* », 1876, 6e Heft, p. 13.

Les pierres tendres et les pierres dures se comportent de façon très différente.
M. Mesnager. *Cours* (autographié) *de Matériaux de Construction*, professé à l'École des Ponts et Chaussées, - 4e Partie, p. 69.

3. — Expériences de M. Bach à Stuttgart, en 1888, sur des cubes d'un grès s'écrasant à 653^k, pressés par une bande d'acier p de largeur z variable (f_4).

Dimensions des blocs *(en 0m01)*			Largeur de la bande d'acier *(en 0m01)*	Effort en kg/$\overline{0^m01}^2$ sous la bande d'acier au moment de la rupture	Rapports	
a	b	h	z	$\xi_\omega = \frac{P}{bz}$	$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{z}{a}$	$\frac{\xi_\omega}{\xi_\Omega = 653^k}$
6^{c}46	6^{c}03	6^{c}00	6^{c}03	653^k	0,933	1
10.04	9.99	9.89	2.50	926	0,249	1,418
10.01	10.01	9.85	2.00	943	0,200	1,453
10.02	10.03	9.82	1.50	1044	0,150	1,599
9.99	9.95	9.84	1.00	1193	0,100	1,827
9.96	10.02	9.84	0.50	2050	0,050	3,139

Bach. « *Elastizität und Festigkeit* ». Berlin chez Springer, 1889-1890, p. 49.

mente, de sorte que l'effort par $\overline{0^m01}^2$ sur la section ainsi augmentée croît peu[4, 5].

La résistance par $\overline{0^m01}^2$ augmente quand l'épaisseur diminue[6, 7, 8, 9].

On l'accroît en trempant le plomb, en lui alliant de l'antimoine[8].

4. — Voici ce qu'a produit une charge croissant jusqu'à 930^k sur un cube de 8^{cm}.
La hauteur a diminué de $5^{cm}7$; la base s'est étalée de 64^{cm^2} à 196^{cm^2}; la pression sur la base primitive s'élevant de 310^k à 930^k, la pression sur la base élargie n'a augmenté que de 239^k à 304^k.

Zeitschrift für Bauwesen, 1888, p. 235 à 260, Pl. 38, 39, 40 : « *Steinbrücken mit gelenkartigen Einlagen* », Stuttgart novembre 1887, Leibbrand, Kgl. Ober-Baurat.

5. — Sous une trop forte pression, le plomb coule continuement.
Au Viaduc du Viaur, on a soumis pendant 859 jours à une pression de 120^k deux plaques de plomb de $9^{mm}68$ d'épaisseur initiale : elles ont cédé assez régulièrement par jour de $2^{\mu}32$, soit $\frac{2,4}{10^4}$ de leur épaisseur.

Expériences de M. Lannusse, Ingénieur des Ponts et Chaussées, 1901-1903.

6. — En plaques carrées de 10^{cm}, le plomb mou a coulé :
avec 8^{mm} d'épaisseur, sous 425^k par $\overline{0^m01}^2$;
avec 4^{mm} d'épaisseur, sous 575^k.

Expériences faites à Munich. — Deutsche Bauzeitung, 1906, 21 avril, p. 219 à 222 ; 28 avril, p. 232 à 236 ; 12 mai, p. 261 à 264 : « *Die Illerbrücken bei Kempten in Allgäu* », von Regierungs Baumeister a. D. Colberg, Direktor der Firma Dyckerhoff und Widmann, p. 263.

De même, le mortier résiste en briquettes « normales » de 22^{mm} d'épaisseur, 1 fois 1/2 à 2 fois comme en cubes ; — en joints minces, 2 à 4 fois comme en cubes.

Communication faite par M. H. Tavernier, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, au Congrès des Méthodes d'essais, Paris, 9-16 juillet 1900.

7. — Aux essais faits à Munich par M. le Professeur Föppl, une bande de plomb de $10^{cm} \times 30^{cm} \times 5^{mm}$.

chargée, par $\overline{0^m01}^2$, de :	s'est comprimée, sous la charge, de :	après enlèvement de la charge, est restée comprimée de :	
280^k	$1^{mm}2$	$1^{mm}09$	sans couler
840^k	$1^{mm}24$	$1^{mm}10$	sans couler
1030^k	»	»	en commençant à couler
1200^k	»	$1^{mm}5$ au max.	en s'élargissant par places de 1^{cm}

Beton und Eisen, 1904, p. 9 à 17, Pl. II. « *Münchner Brückenbauten* » *II.* « *Die Reichenbachbrücke in München* ». E. Burk.

8. — Essais faits en 1885 à Stuttgart au « Material-Prüfungs-Anstalt ».

	Charge en $kg/\overline{0^m01}^2$, supportée		Sources
	sans déformation	en s'affaissant lentement	
Cubes de 8^{cm} — Plomb fondu	52^k pendant 26^h sans gonflement latéral	74^k - Gonflement latéral	Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1885, p. 629.
Cubes de 8^{cm} — Plomb trempé	258^k	310^k	
Disques de plomb fondu ou laminé, de 16^{cm} de diamètre, 15^{mm} d'épaisseur	103^k	155^k	
Plaques carrées de 7^{cm} de côté, 25^{mm} d'épaisseur, à 5 0/0 d'antimoine	413^k	517^k	Fortschritte der Ingenieurwissenschaften. « *Gewölbte Brücken* », K. von Leibbrand. Leipzig, 1897, p. 45.

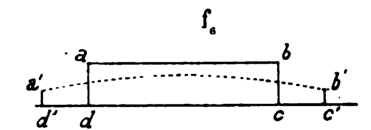
9. — Aux essais faits par M. Beutel, Ingénieur en chef de la Construction des Chemins de fer bavarois, à Munich, des plaques de plomb de $5^{cm}1 \times 5^{cm}1 \times 8^{mm}$:

chargées par $\overline{0^m01}^2$ de :	39^k	77^k *	115^k	154^k	192^k	400^k
se sont comprimées de :	$0^{mm}08$	$0^{mm}16$	$0^{mm}20$	$0^{mm}53$	$0^{mm}59$	$2^{mm}44$

* plus grande pression réalisée dans les ponts pour lesquels on a fait les essais.

Renseignements gracieusement adressés par M. Beutel, — juillet 1911.

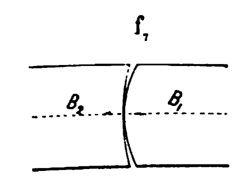
§ 3. — *COMMENT UNE BANDE DE PLOMB RÉALISE UNE ARTICULATION* [10]



Le dessus plan, *ab*, des bandes de plomb, coule sous la compression[11] qui s'exerce, tantôt sur *a*, tantôt sur *b*, et prend la forme *a'b'* (f_6).

CHAPITRE II

ARTICULATIONS ROULANTES [12]



§ 1. — *PRINCIPE*

Un bloc convexe B_1 roule sur un bloc concave ou plan B_2 (f_7). Ils sont, ou en acier, ou en pierre dure, ou en béton, armé ou non.

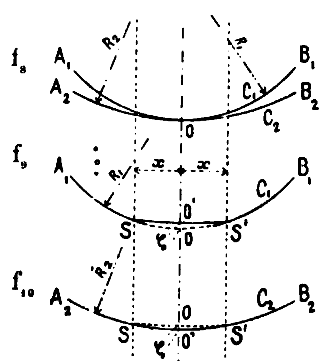
§ 2. — *FORMULES THÉORIQUES DONNANT :*

1° - LA LARGEUR EN 0m01 DE LA BANDE DE CONTACT;

2° - LE TRAVAIL MAXIMUM PAR $\overline{0^m01}^2$ AU CONTACT.

Art. 1. — Notations et unités, employées dans les formules.

Plaçons le cylindre convexe de rayon R_1 sur le cylindre concave de rayon R_2 (f_8).



S'il y a pression, le contact, d'abord réduit à l'arête O, s'élargit à $2x$ (f_9, f_{10}).

A_1OB_1 s'aplatit (f_9) et A_2OB_2 se creuse (f_{10}) suivant la courbe SO'S' de flèche OO' = ζ.

La compression β (kg/$\overline{0^m01}^2$) est maxima en O, nulle en S et S'.

Moins les rayons diffèrent, plus est large la bande de contact, plus y est réduit le travail par $\overline{0^m01}^2$, mais moins est fixé le centre de pression.

10. — On a très exceptionnellement employé, au lieu de plomb, des plaques d'asphalte :
en 1886, à un pont en béton de 29m à Erlach, (Deutsche Bauzeitung, 1906, p. 595 : *Fortschritte im Bau weitgespannter massiver Brücken*, Landesbaurat Leibbrand),
en 1890, aux naissances des 2 voûtes en béton de 23m au 1/5, expérimentées par la Commission des Ingénieurs et Architectes autrichiens, (Tome III - Liv. II).

11. — Les feuilles de plomb sous les appuis des tabliers métalliques se maintiennent si elles sont emprisonnées dans des feuillures. Sinon, elles s'allongent en long et en travers : on a constaté des allongements atteignant 15cm.

A l'entrée d'un train, le bord extrême rencontré le premier cède ; puis, la travée chargée prend une flèche qui comprime l'autre bord.

12. — « *Walzgelenke* » des Ingénieurs allemands.

Soient :

R_1, R_2, les deux rayons en 0^m01 ;

N la pression normale en kg. par 0^m01 de longueur d'arête (pression totale en kg. divisée par la longueur en 0^m01 de l'arête) ;

$\varepsilon_1 \times \overline{10}^5$, $\varepsilon_2 \times \overline{10}^5$, les coefficients d'élasticité des deux solides B_1, B_2 (kg/$\overline{0^m01}^2$)

ν_1, ν_2, les coefficients de Poisson, c'est-à-dire les rapports :

$$\frac{\text{dilatation transversale relative}}{\text{raccourcissement longitudinal relatif}}$$ [13, 14]

Les formules théoriques indiquées plus loin supposent la matière homogène et isotrope : elles donnent, en fonction de R_1, R_2, N, ε, ν, la largeur $2x$ (en 0^m01) de la bande de contact, et le travail maximum qui s'y produit, MAX β (en kg/$\overline{0^m01}^2$).

Art. 2. — Formules de Hertz.

— Hertz[15] a, par la théorie de l'Elasticité, établi des formules qui, avec mes notations et unités, sont les suivantes :

$$2x = \frac{4}{100\sqrt{10\pi}}\sqrt{\left(\frac{1-\nu_1^2}{\varepsilon_1}+\frac{1-\nu_2^2}{\varepsilon_2}\right)\frac{N}{\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}}} \qquad (1)$$

$$\text{MAX }\beta = \frac{4}{\pi}\left(\frac{N}{2x}\ \text{pression moyenne}\right) = \frac{100\sqrt{10}}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\frac{N}{\frac{1-\nu_1^2}{\varepsilon_1}+\frac{1-\nu_2^2}{\varepsilon_2}}\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)} \qquad (2)$$

Si, (et c'est le cas général), les deux cylindres sont de même matière, $\nu_1 = \nu_2$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$; les formules deviennent :

$$2x = \frac{4\sqrt{2}}{100\sqrt{10\pi}}\sqrt{\left(\frac{1-\nu^2}{\varepsilon}\right)\frac{N}{\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}}} = \frac{\eta}{\sqrt{\varepsilon}}\sqrt{\frac{N}{\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}}} \qquad (1')$$

$$\text{MAX }\beta = \frac{4}{\pi}\left(\frac{N}{2x}\right) = \frac{100\sqrt{10}}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{N\varepsilon}{1-\nu^2}\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)} = \chi\sqrt{\varepsilon}\sqrt{N\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)} \qquad (2')$$

Pour $\nu =$	0,25	0,30	1/3
on a : $\eta =$	0,009772	0,009628	0,009515 [17]
$\chi =$	130,294	132,248	133,809

13. — Soient : b une dimension transversale, l une dimension longitudinale : on a $\nu = \dfrac{\frac{\Delta b}{b}}{\frac{\Delta l}{l}}$.

14. — Pour les corps homogènes isotropes, Poisson avait indiqué la valeur théorique $\nu = \frac{1}{4}$.

L'expérience donne : entre 0 et 1/2 pour tous les corps solides ; - entre 0,26 et 0,36 pour l'acier ; - des valeurs très diverses pour la pierre.

M. Mesnager : *Cours* (autographié) *de Matériaux* professé à l'Ecole des Ponts et Chaussées, 5e Partie : Métaux, - 1909, p. 26, 27.

15. — Journal für die reine und angewandte Mathematik, 1882, p. 156 à 171 « *Uber die Berührung* « *fester elastischer Körper* ». Heinrich Hertz - Janvier 1881.

16. — Soient 2 rotules de mêmes rayons R_1, R_2, soumises au même effort N par 0^m01 de contact, ayant même μ ; le rapport des largeurs de contact sera : $\frac{2x}{2x'} = \sqrt{\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}}$.

17. — En interprétant les formules de M. Boussinesq « *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques* » (1885), M. l'Ingénieur en chef Galliot et M. Rousseau ont retrouvé les formules de Hertz, mais avec :

$\eta = 0{,}00691$ et $\chi = 184$ (M. Galliot).

$\eta = 0{,}00957$ et $\chi = 132{,}98$ (M. Rousseau).

Annales des Ponts et Chaussées, septembre 1892, p. 391 et suivantes. « *Note sur le calcul des efforts dans les corps cylindriques en contact* ». M. Galliot, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Annales des Travaux publics de Belgique, avril 1910, n° 2, p. 181. « *Note relative au Calcul des rotules et des rouleaux de* « *dilatation* », par E. Rousseau, Capitaine du Génie de réserve, Ingénieur aux Ateliers de construction électrique de Charleroi.

Si on accepte :

$$n = 0{,}0096 \qquad \chi = 132$$

les 2 formules pratiques à appliquer sont :

$$2x \left(\begin{smallmatrix}\text{largeur en } 0^m01 \\ \text{de la bande de contact}\end{smallmatrix}\right) = \frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{\frac{N}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}} \qquad (1'')$$

$$\text{MAX}\ \beta \left(\begin{smallmatrix}\text{effort maximum en Kg}/\overline{0^m01}^2 \\ \text{dans la bande de contact}\end{smallmatrix}\right) = 1{,}273 \left(\frac{N}{2x}\right) = 132\sqrt{\varepsilon}\ \sqrt{N\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} \qquad (2'')$$

	Pierres							Acier		
		Béton de ciment								
Pour ε =	1	1 1/2	2	3	4	5	6	18	20	22
$\frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}}$ =	0,0096	0,0078	0,0068	0,0055	0,0048	0,0043	0,0039	0,00226	0,00215	0,00205
$132\sqrt{\varepsilon}$ =	132	162	187	229	264	295	323	560	590	619

Pour $R_1 = R_2$, on aurait $2x = \infty$ et MAX $\beta = 0$. Les formules ne s'appliquent pas pour R_1, R_2 peu différents.

Pour un cylindre convexe roulant sur un plan ($R_2 = \infty$), les équations 1'', 2'' deviennent :

$$2x = \frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{NR} \qquad (1''')$$

$$\text{MAX}\ \beta = \frac{4}{\pi}\left(\frac{N}{2x}\right) = 1{,}273\left(\frac{N}{2x}\right) = 132\sqrt{\varepsilon}\ \sqrt{\frac{N}{R}} \qquad (2''')$$

Art. 3. — Formules de Köpcke (f_{11}).

f_{11}

$$\text{MAX}\ \beta = 25 \sqrt[3]{\frac{9}{10}\,\frac{N^2\varepsilon}{h}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}$$

$$2x = \frac{3\,N}{2\ \text{MAX}\ \beta} = 0{,}02 \sqrt[3]{\frac{30\,Nh}{\varepsilon\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}}$$

Si une des 2 surfaces est plane, $R_2 = \infty$.

$$\text{MAX}\ \beta = 25 \sqrt[3]{\frac{9\,N^2\varepsilon}{10\,Rh}} \ {}^{20} \qquad 2x = 0{,}02 \sqrt[3]{\frac{30\,N\,Rh}{\varepsilon}}$$

18. — Zeitschrift des Architekten und Ingenienr Vereins zu Hannover, 1888, p. 373 à 380. « *Uber die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben* », von Geh. Finanzrath C. Köpcke zu Dresden.

19. — Elles résultent d'une série d'hypothèses, dont quelques-unes un peu osées.

f_{12}

20. — Si au lieu d'un bloc d'articulation on avait un rouleau de longueur l entre 2 plaques (f_{12}), $h = R$,

$$\text{MAX}\ \beta = 25 \sqrt[3]{\frac{9\,N^2\varepsilon}{10\,R^2}}$$

D'où :

$$Nl = P = \frac{8}{3} lR\ \text{MAX}\ \beta \sqrt{\frac{\text{MAX}\ \beta}{\varepsilon \times 10^6}}$$

C'est la formule en usage pour calculer les rouleaux de dilatation des ponts métalliques. (M. Résal. *Ponts métalliques*, chez Baudry, 1885, Tome I, p. 91).

Art. 4. — Formules de Barkhausen [21] (f_{11}).

Soit :

$$c = \frac{R_1 \varepsilon \times \overline{10}^5 \times e\left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)}{4\,Nh}$$

M. Barkhausen propose :

$$\frac{x}{R_1}\left[\frac{\text{MAX. }\beta}{\frac{N}{e}} - \frac{c}{3}\,\frac{x^2}{R_1^2}\right] = \frac{e}{2R_1} \qquad (1)$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} + \sqrt{\frac{R_2^2}{4} - \frac{4\,NR_2 h \log.\text{nat.}\left(1 + \frac{\text{MAX. }\beta}{\frac{N}{e}}\right)}{\varepsilon \times \overline{10}^5 \times e \times \left(\frac{x}{R_1}\right)^2}} \qquad (2)$$

Ces formules supposent R_1 compris entre $\frac{R_2}{2}$ et R_2 : elles ne s'appliquent, ni pour R_1 très voisin de R_2, ni pour $R_2 = \infty$ (surface convexe roulant sur un plan).

On les résout par essais [22], [23] ; ils ne laissent pas d'être assez longs.

21. — Centralblatt der Bauverwaltung, 16 mai 1900, p. 232 : « *Berechnung der in den Gelenken stei-* « *nerner Brücken auftretenden grössten Pressungen* », M. Schuster.

22. — Voici le calcul de x et de MAX. β fait par M. Barkhausen [×] pour l'articulation de clef du Pont de Hauconcourt sur la Moselle : (Portée, 33m ; montée, 4m30).

$R_1 = 235^{cm}$, $R_2 = 300^{cm}$, $h = 61^{cm}$, $e = 70^{cm}$, $N = 1590^{k}$, $\varepsilon = 2$, d'où $c = 1837$.

L'équation (1) est :

$$\frac{x}{R_1}\left[\frac{\text{MAX. }\beta}{\frac{1590}{70}} - \frac{1837}{3}\,\frac{x^2}{R_1^2}\right] = \frac{70}{2 \times 235}, \text{ d'où MAX. } \beta = \frac{1590}{70}\left[\frac{70}{2 \times 235}\,\frac{1}{\frac{x}{R_1}} + \frac{1837}{3}\,\frac{x^2}{R_1^2}\right]$$

L'équation (2) est : $235 = \frac{300}{2} + \sqrt{\frac{\overline{300}^2}{4} - \frac{4 \times 1590 \times 300 \times 61}{2 \times \overline{10}^5 \times 70 \times \frac{x^2}{R_1^2}} \log.\text{nat.}\left(1 + \frac{\text{MAX }\beta}{\frac{1590}{70}}\right)}$

Essayons $\frac{x}{R_1} = 0{,}0316$

$$\text{MAX. }\beta = \frac{1590}{70}\left[\frac{70}{2 \times 235} \times \frac{1}{0{,}0316} + \frac{1837}{3}\ \overline{\times\ 0{,}0316^2}\right] = 121^{k}$$

$$235 = 150 + \sqrt{22500 - \frac{116{,}388}{14} \times \frac{1{,}84371}{\overline{0{,}0316}^2}} = 234{,}6$$

Approximation suffisante.

Avec cette valeur de $\frac{x}{R_1}$ les formules donnent : MAX. $\beta = 121^{k}$ $2x = 14^{cm}8$.

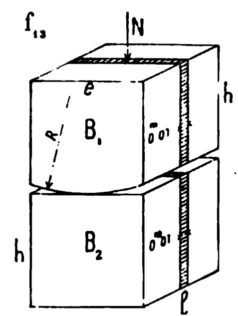
× A. Teichmann : « *Zahlenbeispiel zur statischen Berechnung von massiven Dreigelenkbrücken vermittelst Einflusslinien* », p. 3, C. W. Kreidel's Verlag, Wiesbaden 1904.

23. — Les formules de Hertz, Barkhausen, Köpcke, donnent des résultats fort différents. Les voici pour la clef du Pont de Hauconcourt *(Art. 4, renv. 22)* :

Formules de	Hertz	Köpcke	Barkhausen
$2x$	8c8	23c	14c8
MAX. β	229k	103k	121k

§ 3. — *EXPÉRIENCES SUR DES ARTICULATIONS EN PIERRE, EN BÉTON*

Art. 1. — Expériences de M. Bach sur des blocs de granit et de grès, l'un convexe, l'autre plan (f_{13}), pour vérifier les formules de Hertz (§ 2, art. 2) :



$$2x \left(\begin{matrix}\text{Largeur en } 0^{m}01\\ \text{de la bande}\\ \text{de contact}\end{matrix}\right) = \frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{NR} \qquad (1''')$$

[24]

$$\text{MAX } \beta \left(\begin{matrix}\text{effort maximum}\\ \text{en Kg } \overline{0^{m}01}^{2} \text{ sur}\\ \text{l'arête de contact}\end{matrix}\right) = 1{,}273 \left(\frac{N}{2x}\right) = 132\sqrt{\varepsilon}\, \sqrt{\frac{N}{R}} \qquad (2''')$$

A. - Ce qui a été observé. — M. Bach a éprouvé : d'abord des blocs de granit à surfaces très exactement tournées et dressées [25] ; plus tard, du grès [26].

Il a relevé les empreintes du contact sous les charges N, les a planimétrées, puis, en divisant leur surface par la longueur l du contact, obtenu la largeur $2x$.

On n'a pas le moyen de mesurer MAX β : on a seulement $\frac{N}{2x}$.

Les deux surfaces, pressées l'une contre l'autre, se touchent, non suivant une bande pleine, mais d'abord par des îlots isolés, puis par des surfaces continues, mais avec des îlots non pressés (f_{14}).

Expériences sur des blocs de granit ($e = 30^{cm}$, $h = 50^{cm}$).

f_{14} — Bandes de contact — 1/3

Essai 24 — A — F — G — *(Lettres du Tableau I)*

N = 498k 2992k 4987k | 498k 2992k 4987k | 498k 2992k 4987k

24. — Les notations et unités sont celles indiquées § 1, art. 1, - et répétées p. 15.

25. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1903, p. 1439 : « *Versuche mit Granitquadern zu Brückengelenken* », C. Bach.

26. — Id., 1904, p. 1915. « *Versuche mit Sandsteinquadern zu Brückengelenken* ». C. Bach.

TABLEAU I. — Largeur $2x$. — Rapports $\frac{2x}{\sqrt{N}}$, $\frac{\overline{0,0096}^2\,NR}{4x^2}$ [qui, d'après la formule (1''') de Hertz devrait être ε *]

ε * (pour le granit éprouvé) : 2,55 à 4,02 — * $\varepsilon \times 10^5$ = Coefficient d'élasticité en Kg/$\overline{0^m01}^2$

R Rayon du bloc convexe													
	l..... Longueur en 0^m01 de l'arête de contact	20c05 (A)				20c15 (B)				20c05 (C)			
	N.... (en Kg par 0^m01 de l)	498^k	2493^k	4738^k	4987^k Rupture		2853^k	4094^k	4590^k Rupture	498^k	2493^k	4488^k	4728^k Rupture
25 cm	$2x$.... Largeur moyenne mesurée de la bande	0^c42	0^c90	1^c35	1^c40		1^c16	1^c23	1^c24	0^c43	0^c99	1^c40	1^c47
	$\frac{2x}{\sqrt{N}}$...	0,018	0,018	0,019	0,019		0,021	0,019	0,018	0,019	0,019	0,020	0,021
	$\frac{\overline{0,0096}^2\,NR}{4x^2} = \varepsilon$	6,99	6,99	6,27	6,27		5,13	6,27	6,99	6,27	6,27	5,66	5,13
	l.....	20c10 (D)				20c10 (E)				20c05 (F)			
	N...	497^k	2485^k	3980^k	4975^k Rupture	497^k	2985^k	4975^k	5970^k Rupture	498^k	2992^k	5984^k	6483^k Rupture
100 cm	$2x$....	0^c95	2^c16	2^c73	3^c05	1^c01	2^c51	3^c32	3^c68	1^c01	2^c32	3^c43	3^c59
	$\frac{2x}{\sqrt{N}}$...	0,042	0,043	0,043	0,043	0,045	0,045	0,047	0,047	0,045	0,042	0,044	0,044
	$\frac{\overline{0,0096}^2\,NR}{4x^2} = \varepsilon$	5,13	4,01	4,01	4,01	4,47	4,47	4,10	4,10	4,47	5,13	4,68	4,68
	l.....	20c05 (G)				20c00 (H)				20c10 (I)			
	N....	498^k	3990^k	7481^k Rupture		500^k	4000^k	7640^k Rupture		497^k	3980^k	7960^k Rupture	
375 cm	$2x$....	1^c47	5^c44	7^c85		2^c02	5^c54	8^c66		2^c24	6^c74	9^c11	
	$\frac{2x}{\sqrt{N}}$...	0,065	0,086	0,090		0,090	0,087	0,099		0,100	0,106	0,102	
	$\frac{\overline{0,0096}^2\,NR}{4x^2} = \varepsilon$	8,04	4,68	4,18		4,29	4,68	3,52		3,48	3,10	3,35	

TABLEAU II. — Rupture des blocs.

$\mathcal{N}$ Charge de rupture par 0^m01 d'arête

Pression de rupture dans la bande de contact (en Kg/$\overline{0^m01}^2$) { moyenne $\frac{\mathcal{N}}{2x}$; MAX (sur l'axe de la bande) $= 1,273\,\frac{\mathcal{N}}{2x} = \Xi$ }

II_A — Granit — ξ (résistance à l'écrasement en cubes) = 1200^k à 1500^k

R (en 0^m01)	25cm (A)	(B)	(C)	100cm (D)	(E)	(F)	375cm (G)	(H)	(I)
$\frac{2x}{l}$	0,046	0,041	0,049	0,10	0,12	0,12	0,29	0.29	0,30
$\mathcal{N}$	4987^k	4590^k	4728^k	4975^k	5970^k	6483^k	7481^k	7640^k	7960^k
$\frac{\mathcal{N}}{2x}$	3562^k	3701^k	3216^k	1631^k	1622^k	1806^k	953^k	882^k	873^k
Ξ	4536^k	4727^k	4106^k	2077^k	2066^k	2300^k	1214^k	1124^k	1113^k

II_B — Grès — ξ (résistance à l'écrasement en cubes) = 540^k à 620^k

R (en 0^m01)	10^{cm}	20^{cm}	40^{cm}	100^{cm}	375^{cm}
$\frac{2x}{l}$	0,088	0,119	0,20	0,37	0,91
$\mathfrak{N}$	1366^k	1466^k	1826^k	2686^k	6666^k
$\frac{\mathfrak{N}}{2x}$	1030^k	814^k	606^k	483^k	486^k
Ξ	1312^k	1037^k	772^k	616^k	619^k

B. - Ce qui résulte des expériences.

I. Largeur 2 x de la bande de contact (Granit - Tableau I).

a. - Pour le rayon de 25^{cm} et celui de 100^{cm}, $\frac{2x}{\sqrt{N}}$ a été sensiblement constant, c'est-à-dire que, suivant la formule (1''') de Hertz, la largeur de la bande de contact a été, pour ces 2 rayons, proportionnelle à la racine carrée de la charge.

b. - Le rapport $\frac{\overline{0,0096}^2 \, NR}{4\,x^2}$ a varié de 3 à 8. Or, d'après la formule (1''') de Hertz, ce serait le coefficient ε, lequel, pour le granit éprouvé, ne variait que de 2,55 à 4,02.

II. Rupture. — Charge $\mathfrak{N}$ sur la bande de contact.

Pressions moyenne $\frac{\mathfrak{N}}{2x}$ *et maxima* $\Xi = 1,273 \frac{\mathfrak{N}}{2x}$ (Granit et grès - Tableaux II_A et II_B).

a. - R augmentant, $\mathfrak{N}$ augmente, Ξ diminue et paraît tendre vers la pression de rupture du matériau en cubes.

b. - Pour un même rayon, Ξ augmente avec l'épaisseur *e* [27].

c. - Sur 9 essais, le bloc convexe B_1 s'est rompu 2 fois le 1er.

d. - Les blocs se fendent, à partir du contact, près du plan diamétral passant par l'arête de contact : on voit, sur la photographie de blocs sous charge, la fissure plus ouverte au milieu ; elle se refermait quand on supprimait la pression.

f_{13}

C'est la tension qui rompt les blocs.

D'ailleurs, les pierres ne sont ni homogènes, ni isotropes ; elles n'ont pas, à vrai dire, de coefficient d'élasticité [28] ; les rotules de pierre s'appliquent mal l'une sur l'autre ; toutes conditions contraires à celles que supposent les formules de Hertz [29].

Il ne faut donc pas s'étonner si les essais ne les justifient guère.

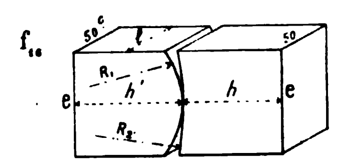
27. — R = 20^{cm}, $h = 15^{cm}$

e =	10^{cm}	15^{cm}	20^{cm}
Ξ =	925^k	1037^k	1150^k

loc. cit., renvoi 26.

28. — Tome III, Livre II.

29. — Hertz a vérifié ses théories pour le verre : lentille de verre sur plaque de verre.

f₁₄ 

Art. 2. — Expériences faites à Berlin et à Dresde sur des rotules en béton [30] (f_{14}).

Expériences faites : au Laboratoire mécano-technique de	à l'occasion de la construction de 4 Ponts sur la Moselle Nom - *(Portée)* MAX. β (clef) kg/$\overline{0^m01}^2$	Rotules éprouvées — Dimensions en 0m01 — R_1	R_2	e	h (h')	Composition du béton	Age du béton en jours	Charge, en Tonnes, par 0m01 de l produisant : la première fissure dans le bloc — concave $\mathfrak{N}$	convexe $\mathfrak{N}$	la rupture $\mathfrak{N}'$
Charlottenburg (Berlin)	[31] Hauconcourt *(33m)* 25k	235c	300c	70c	61c	1v, 2v5, 2v5 — noyau : 1v, 1v5, 1v5	150 j	4t7 [35] 4t2 [35]	— —	— 10t
	[32] Malling 1899–1901 *(40m)* 22k8	280c	325c	94c5	91c	[36, 38] 1v, 2v, 2v	400 j	8t 7t4 7t5 7t1	9t1 5t3 7t4 7t	— — — —
	[33] Moulins-lès-Metz 1904–1905 *(44m)* 23k34	280c	325c	95c5	93c5 (96c) 94c5 (96c5)	[36, 38] 1v, 2v, 2v	115 j 116 j 126 j	8t1 [35] 8t1 [35] 7t3 [35]	Pas de fissure sous : 11t8 11t7 [35] 9t1 [35]	Pas de rupture sous: — 11t8 [37] 12t [37]
Dresde	[34] Sauvage 1906–1907 *(36m)* 23k	250c	327c	65c	70c	[36, 38] 1v, 2v, 2v	210 j	5t5 7t 6t	Pas de fissure 7t2 6t7	10t7 12t7 12t2

Voici des largeurs de bande de contact observées au laboratoire de Dresde sur des rotules de mêmes dimensions que celles du pont de Sauvage (béton à 170 jours) :

Charge en kg par 0m01 d'arête de contact N	Largeur de la bande de contact en 0m01 : $2x$ — mesurée	calculée par la formule de Hertz (§ 2, art. 2) $\frac{0{,}0096}{\sqrt{\varepsilon}}\sqrt{\frac{N}{\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}}}$ Avec $\varepsilon = 1.5$	Barkhausen (§ 2, art. 4)
2000k	7c5	11c3	19c5
4000k	14c3	16c	23c8
6000k	18c5	19c6	30c

30. — Centralblatt der Bauverwaltung, 22 juillet 1908, p. 395, 396. « *Über Gelenkquader aus Beton* » vom Regierungs und Geheimen Baurat Blumhardt in Strassburg, et : Deutsche Bauzeitung 1908, 23 mai p. 283 à 288, 3 juin p. 303 et 307. « *Die Anwendung von Gelenken bei Brückenbauten..* » M. A. Köhler, Ing. dipl. Dir. technique de la Maison Windschild et Langelott de Cossebaude, près Dresde.

31, 32, 33, 34. — Voir pour ces ponts Livre III.

35. — Fissure dans le plan de symétrie passant par l'arête de contact.

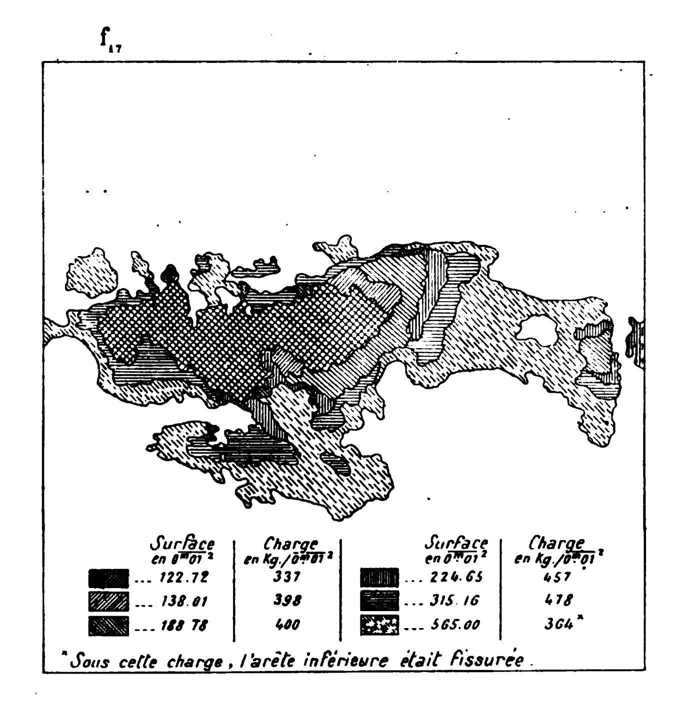
36. — Surfaces de contact au mortier à 1v, 1v.

37. — Puissance maxima de la presse.

38. — Voici la moyenne de 3 essais sur des cubes de 30c :

Age du béton en jours	Charge en kg/$\overline{0^m01}^2$ produisant — les fissures	la rupture
59 j	341k	359k
87 j	445k	466k

f_{17}



Aux essais pour le Pont de Moulins-lès-Metz, on a pris[39] sur papier bleu l'empreinte des surfaces en contact sous les charges (f_{17}).

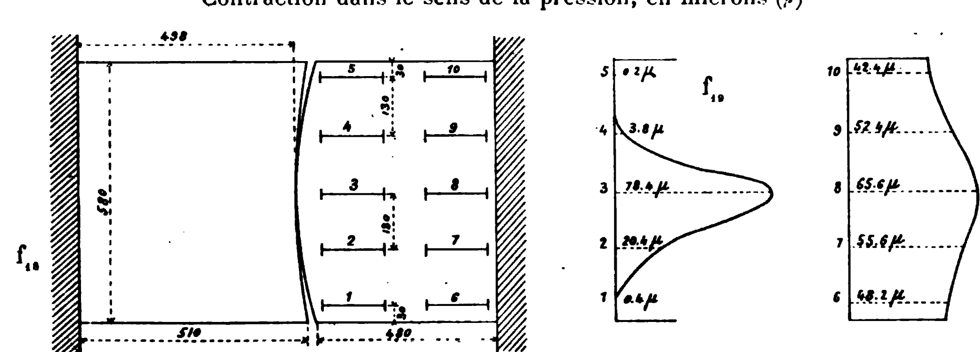
Malgré le soin apporté à leur exécution, elles sont fort irrégulières.

La pression moyenne par $\overline{0^m01}^2$ sur la bande de contact, — charge totale rapportée aux surfaces d'empreinte, — croît d'abord, puis diminue légèrement jusqu'à l'apparition des fissures (f_{17}).

Art. 3. — Expériences de M. Krüger sur des rotules en béton (1906)[40].

Dans le sens de la pression, les fibres centrales se raccourcissent. C'est la fibre passant par le contact qui se raccourcit le plus (f_{18}, f_{19}).

Contraction dans le sens de la pression, en microns (μ)

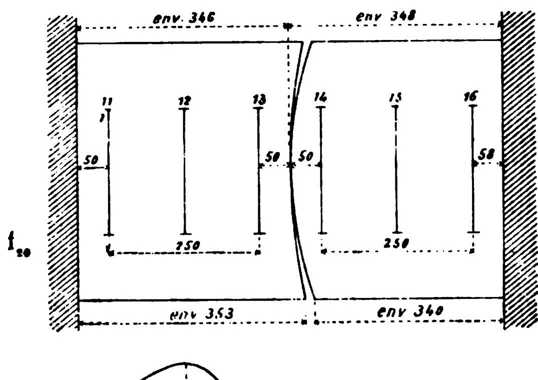


39. — Deutsche Bauzeitung, 1908, 23 mai, p. 283 à 288 ; — 3 juin, p. 303 et 307 : « *Die Anwendung von Gelenken bei Brückenbauten* ». - M. A. Köhler, Ing. Dipl., Directeur technique de la maison Windschild et Langelott, de Cossebaude, près Dresde.

40. — A l'occasion de la construction du « Dresdener Innundations Viadukt » par l'Administration des Chemins de fer de Saxe. — On a mesuré les déformations au 1/5 de micron $\left(\frac{\mu}{5}\right)$ avec l'appareil optique Martens.

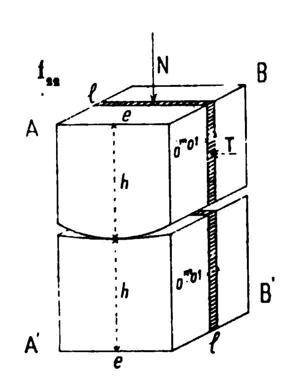
Deutsche Bauzeitung, 1906, p. 219 à 222, 232 à 236, 261 à 264 : « *Die Illerbrücken bei Kempten in Allgäu* », M. Colberg.

Dilatation transversale, en microns (μ)



Normalement à la pression, comme toujours dans les prismes comprimés, les sections s'élargissent : il y a tension latérale (f_{20}, f_{21}). C'est elle qui rompt les blocs.

Le rapport : $\dfrac{\text{allongement transversal relatif}}{\text{raccourcissement longitudinal relatif}}$ (coefficient de Poisson)[41] est à peu près 28/100.



On en déduit :

$$T\left(\begin{array}{c}\text{effort de traction sur une tranche}\\ \text{perpendiculaire à l'arête de contact,}\\ \text{de } 0^m01 \text{ d'épaisseur et de hauteur } h\end{array}\right) = 0{,}28\ N\left(\begin{array}{c}\text{compression}\\ \text{par } 0^m01 \text{ d'arête}\\ \text{de contact}\end{array}\right)$$

$$\eta\left(\begin{array}{c}\text{effort moyen de traction}\\ \text{par } \overline{0^m01^2}\end{array}\right) = \frac{T}{h\ (\text{en } 0^m01)}$$

Si T est distribué suivant les ordonnées d'une parabole,

$$\text{MAX}\ \eta = \frac{3}{2}\,\frac{T}{h} = 1{,}5 \times \frac{0{,}28\ N}{h} = 0{,}42\,\frac{N}{h}$$

La dilatation maxima, par suite la tension maxima, se produit à une distance du point de contact égale à la moitié de l'épaisseur e du sommier (f_{21}).

Pour qu'il n'y ait pas de tension transversale dans les lits AB, A'B', des sommiers (f_{22}), leur hauteur h sera au moins égale à leur épaisseur e.

C'est vers le milieu que se produisent les plus grandes tensions : si la matière n'y résiste pas assez, c'est ce milieu qu'il faudra armer ou fretter.

41. — Voir plus haut, § 2, art. 1.

Art. 4. — Expériences faites au Laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées, à Paris, sur des rotules en porphyre, en calcaire, en béton[42] (1911-1912).

	Rayon du bloc concave en 0^m01 R_2	Charge en Tonnes, par 0^m01 de génératrice de contact fissurant le bloc — concave $\mathfrak{N}$	convexe $\mathfrak{N}$	Charge en kg/$\overline{0^m01}^2$ fissurant des cubes de : 5^{cm} (pierre) 20^{cm} (béton) ξ	Coefficient d'élasticité $E = \varepsilon \times \overline{10}^5$ en kg/$\overline{0^m01}^2$ ε
Porphyre de S[t] Raphaël (Var) $l = h = e = 20^{cm}$	250^c	10^t	12^t5	2641^k	-6.6 à 8.8
	275^c	8^t6	12^t2		
	300^c	12^t5	10^t4		
Calcaire de Ruoms (Ardèche) $l = h = e = 20^{cm}$	250^c	12^t5	7^t1	1451^k	6.8
	275^c	7^t5	5^t		
	300^c	5^t	7^t5		

Béton $l = 40^{cm}$

500[l] sable (S[t] Tropez) 500[l] gravier (Cavaou) — Ciment Portland	Eau douce	soit pour 1[v] ciment — Sable	Gravier	Rayon R_2	Concave $e = h = 40^{cm}$	Concave $e = h = 20^{cm}$	Convexe $e = h = 40^{cm}$	Convexe $e = h = 20^{cm}$	ξ	ε
275^k	84^l	2^v	2^v	250^c	4^t7	1^t8	4^t7	2^t5	221^k (à 120 j)	2.3 à 2.9
				275^c	1^t9	»	3^t1	2^t5		
				300^c	1^t6	3^t8	3^t5	1^t5		
350^k	96^l	1^v6	1^v6	250^c	3^t8	2^t5	3^t8	»	353^k (à 98 j)	1.8 à 2.6
				275^c	2^t1	3^t7	2^t5	3^t7		
				300^c	2^t5	3^t7	3^t8	»		
425^k	107^l	1^v3	1^v3	250^c	6^t3	3^t0	6^t3	3^t0	366^k (à 92 j)	2.5 à 3.1
				275^c	4^t5	3^t4	3^t8	»		
				300^c	2^t5	2^t0	2^t5	»		
500^k	119^l	1^v1	1^v1	250^c	4^t6	3^t1	4^t1	3^t1	363^k (à 85 j)	2.5 à 2.9
				275^c	3^t5	4^t4	3^t5	4^t4		
				300^c	2^t8	»	Pas de fissure	5^t0		

Les blocs se sont, en général, fendus parallèlement à la face A B C D (f_{23}).

Pour le porphyre, et surtout le béton, les bandes de contact étaient fort irrégulières.

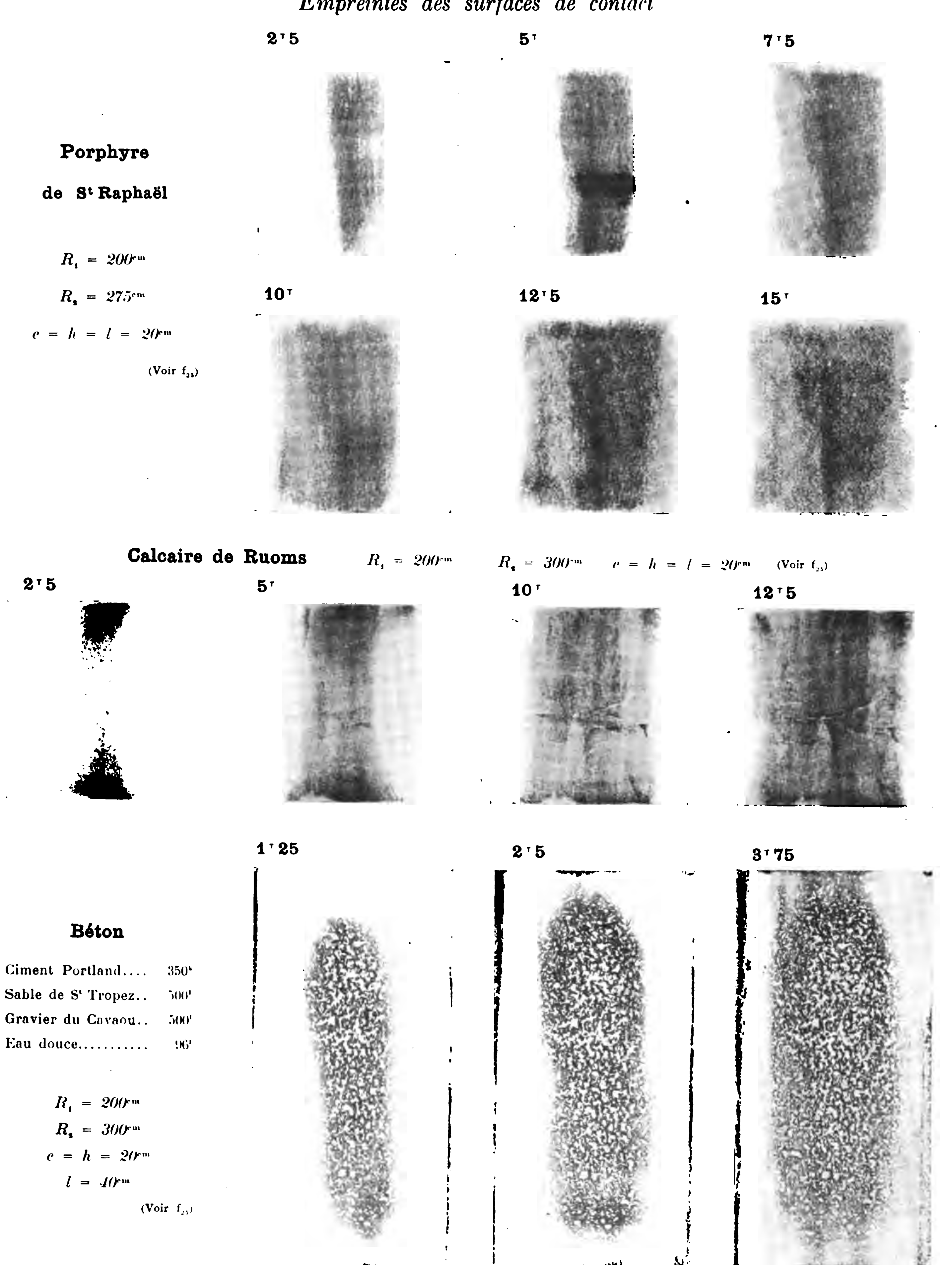
Voici pour celles qui étaient à peu près rectangulaires, les largeurs mesurées et calculées :

	Porphyre de S[t] Raphaël ($\varepsilon = 8$)			Calcaire de Ruoms ($\varepsilon = 6,8$)		
Rayon R_2 =	275^{cm}		300^{cm}	275^{cm}		300^{cm}
Charge N en kg par 0^m01 de longueur d'arête..	5000^k	10000^k	10000^k	5000^k	10000^k	10000^k
Largeur $2x$ en 0^m01 de la bande de contact — mesurée.............	7^c6	13^c	11^c	10^c5	13^c	13^c
calculée par la formule de : Hertz ...... (§ 2, art. 2)	6^c5	9^c2	8^c3	7^c	9^c9	9^c
Barkhausen. (§ 2, art. 4)	9^c6	12^c8	10^c6	10^c	13^c	12^c4
Köpcke..... (§ 2, art. 3)	13^c	16^c4	15^c3	13^c7	17^c3	16^c2
Rapports $\frac{2x}{\sqrt{N}}$	*0,107*	*0,13*	*0,11*	*0.14*	*0,13*	*0,13*
$\frac{\overline{0,0096}^2\ N}{4x^2\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)} = \varepsilon$ (*formule de Hertz*)	*5,8*	*4,0*	*4,6*	*3,1*	*4,0*	*3,3*

42. — Je les ai demandées pour déterminer les rotules de deux passages supérieurs articulés, en béton, à construire sur la ligne de Miramas à l'Estaque.

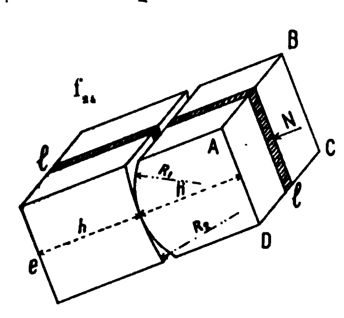
Expériences sur des rotules, faites à l'École des Ponts et Chaussées (1911-1912)

Empreintes des surfaces de contact



Le nombre en haut à gauche de chaque empreinte est la charge N en Tonnes par 0m01 d'arête de contact.

Art. 5. — Que conclure des formules et des essais de laboratoire pour déterminer les dimensions des sommiers ?



On veut articuler une voûte.

Pour chaque paire de sommiers, on calcule la charge normale F qui s'exerce sur l'appui tel que ABCD (f_{24}).

On a donc : $N = \frac{F \text{ (en kg)}}{l \text{ (en 0m01)}}$ (charge normale par 0m01 d'arête de contact)

On a déterminé, pour le « matériau » des sommiers, ses caractéristiques : l'effort ξ en $kg/\overline{0^m01}^2$ qui l'écrase, taillé, ou moulé en cubes, - et son coefficient d'élasticité $\varepsilon \times \overline{10}^5$ ($kg/\overline{0^m01}^2$).

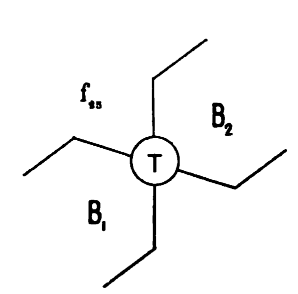
Quelles dimensions *(e, h, l)*, quels rayons R_1, R_2, faut-il adopter pour que N soit le 1/4, le 1/5, de la charge $\mathfrak{N}$ qui rompt le sommier ?

Les formules de Hertz, qui paraissent les plus solides de celles proposées, ont assez mal résisté à l'expérience.

Les essais de laboratoire n'y suppléent pas : ils sont peu nombreux, ne concluent pas. Il en faut d'autres.

A leur défaut, nous essayerons de déduire quelque chose des voûtes faites.

De suite, je puis dire qu'il faut encore être très prudent et, avant de se décider, essayer le « matériau » et les rayons des rotules.



CHAPITRE III

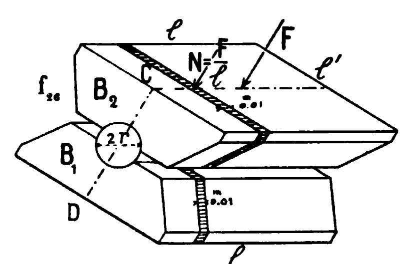
ARTICULATIONS TOURNANTES[43]

§ 1. — *PRINCIPE*

Deux balanciers B_1 B_2 tournent autour d'un tourillon T en fonte ou en acier (f_{25}).

§ 2. — *CALCULS*

Art. 1. — Diamètre du tourillon. — Soient (f_{26}) :



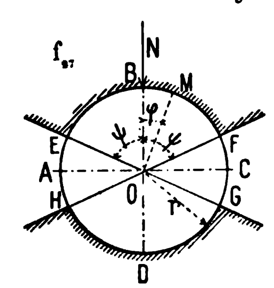
l, l', la longueur et la largeur en 0m01 de la face supérieure du balancier B_2 ;

r le rayon du tourillon en 0m01 ;

F la charge totale en Kg sur le balancier B_2 ;

N la charge en Kg par 0m01 de longueur du tourillon : $N = \frac{F}{l}$;

β la compression permise en $kg/\overline{0^m01}^2$ sur le métal du tourillon.



N se distribue (f_{27}) sur une partie EBF, GDH des 1/2 circonférences ABC, ADC ; elle tend à aplatir le tourillon suivant BD, à l'élargir suivant AC.

Si on l'étale uniformément sur la section diamétrale AOC, on a une compression β' ($Kg/\overline{0^m01}^2$) $= \frac{N}{2r}$

43. — « *Zapfengelenke* » des Ingénieurs allemands.

On calcule r par la formule pratique : $\beta' = \frac{N}{2r} = K\beta$

On se donne K. M. Résal accepte $K = \frac{1}{4}$ [44]. Un calcul, discutable [45], — des expériences, à contrôler [46], permettraient plus.

Art. 2. — Dimensions des balanciers.

— On les calcule comme encastrés dans le plan CD (f_{26}), supportant l'effort $\frac{F}{2}$ à $\frac{l'}{2}$ du plan CD.

§ 3. — *ESSAIS DE M. LE PROFESSEUR FÖPPL A MUNICH* [47],

44. — « *Cours de Ponts métalliques* », Béranger, Paris 1908, Tome I, p. 477.

45. — N se distribue (f_{27}) en une série de pressions élémentaires telles que : $\beta_\varphi \left(\frac{\text{pression par}}{\overline{0^m01}^2 \text{ en M}}\right) \times ds = \beta_\varphi \, r d\varphi$
Sa composante verticale est $r \beta_\varphi \cos \varphi \, d\varphi$. — Il ne paraît pas interdit de supposer avec M. Bach *, que :

$$\beta_\varphi = \beta_0 \text{ (pression par } \overline{0^m01}^2 \text{ en B, laquelle y est maxima)} \times \cos \varphi$$

Supposons encore que N se répartisse, non sur la 1/2 circonférence ABC, mais seulement sur un arc EBF = 2ψ :

$$N = \beta r \int_{-\psi}^{+\psi} \cos^2 \varphi \, d\varphi = \beta r \left(\psi + \frac{1}{2} \sin 2\psi\right)$$

Enfin, si, comme l'admet M. Müller-Breslau * *, EBF est le 1/4 de la circonférence, $2\psi = \frac{\pi}{2}$:

$$N = \beta r \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right) = 1{,}2854 \, \beta r \text{ ou } \beta' = \frac{N}{2r} = 0{,}64 \, \beta$$

* C. Bach — *Maschinen Elemente*, p. 402. * * Müller-Breslau — Vorlesung in Berliner Polytechnikum — *Eiserne Brücken*, p. 39.

46. — M. Bobrowsky a déterminé, sur des tourillons d'un acier de limite d'élasticité β_e, la compression limite par 0^m01 de longueur N_e, à partir de laquelle les déformations du tourillon sont permanentes ; soit, par $\overline{0^m01}^2$ de la section diamétrale, une compression limite $\beta'_e = \frac{N_e}{2r}$

Il a trouvé : Kg/$\overline{0^m01}^2$	1er essai	2e essai	3e essai
Limite d'élasticité de l'acier en cubes . . . . β_e	1910^k	2680^k	3400^k
Compression de la section diamétrale au moment où commence la déformation permanente β'_e	2470	3330	4200
Rapport $\frac{\beta'_e}{\beta_e}$	*1,29*	*1,24*	*1,23*

c'est-à-dire que β'_e serait en moyenne $\frac{5}{4}\,\beta_e$ — Attendons d'autres expériences.

Der Eisenbau, — décembre 1912, p. 447. « *Berechnung der Kippzapfen von Brückengelenken* », S. Bobrowsky.

47. — Charge par $\overline{0^m01}^2$ de surface diamétrale du tourillon			50^k	100^k	200^k	300^k	400^k	500^k	600^k
Coefficient de frottement fonte sur acier	sans graissage		0,235	0,223	0,216				
	avec graissage	à l'huile de machine		0,191	0,192				
	avec graissage	à la graisse de machine		0,171	0,162	0,148			
	avec graissage	au suif		0,015	0,0075	0,0064	0,0048	0,0046	0,0039
	avec graissage	à la stéarine		0,022	0,013	0,010	0,0075	0,006	0,005
	avec graissage	à 1 p. suif, 3 p. stéarine		0,011	0,0046	0,0042	0,0040	0,0038	0,0033
	avec graissage	à la paraffine		0,0062	0,0051	0,0036	0,0027	0,0026	0,0025
Epaisseur en *mm* de la couche de lubrifiant, avec graissage :		*Epaisseur initiale*							
	à l'huile de machine		trop mince en fin d'expérience pour la mesurer. On la constatait seulement au toucher.						
	à la graisse de machine		trop mince en fin d'expérience pour la mesurer. On la constatait seulement au toucher.						
	au suif	0,8		0,3					0,1
	à la stéarine	0,9			0,9				0,25
	à 1 p. suif, 3 p. stéarine	1,4		0,4					0,1
	à la paraffine	1,4		0,4					0,1

(Centralblatt der Bauverwaltung. 24 août 1901, p. 197, 198. « *Reibung in Brückengelenken.* » A. Föppl — Munich — Janvier 1901).

A titre de comparaison, voici ce qu'ont donné des essais faits en 1909 à Paris, au Laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées en vue de la construction par la Cie P-L-M, du pont tournant de Caronte (Ligne de Miramas à l'Estaque).

Charge par $\overline{0^m01}^2$ de surface diamétrale du tourillon			74^k	112^k	148^k	215^k	280^k
Coefficient de frottement acier sur bronze	sans graissage		0,172	0,166	0,167	0,168	0,172
	avec graissage	à l'huile de machine	0,148	0,146	0,142	0,145	0,150
	avec graissage	à la graisse de machine	0,134	0,128	0,129	0,130	0,129
	avec graissage	à la paraffine	0,024	0,017	0,013	0,011	0,009

AU LABORATOIRE D'ESSAIS DE MATÉRIAUX (1901)

1° - Le coefficient de frottement de fonte sur acier diminue quand la pression augmente.

Il y a donc intérêt à augmenter celle-ci : donc à réduire la surface d'appui ; donc à employer des tourillons de petit diamètre.

2° - Le meilleur lubrifiant est la paraffine.

3° - Sous les plus fortes pressions, il subsiste, entre les tourillons et les coussinets, une mince couche de lubrifiant.

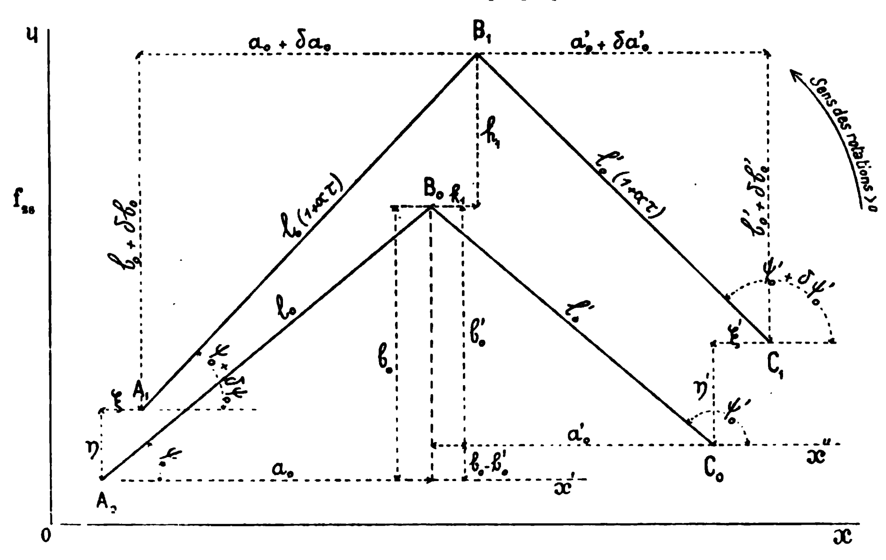
§ 4. — *ROTATIONS AUTOUR DES APPUIS, MOUVEMENTS DE LA CLEF POUR UN CHANGEMENT DE TEMPÉRATURE ET UN DÉPLACEMENT DES APPUIS* (f_{28}).

Art. 1. — Comment change la ligne $A_0 B_0 C_0$ des 3 articulations.

Je suppose, par rapport à une température initiale, un changement de $\tau°$. Chaque dimension linéaire l_0 devient $l_0(1+\alpha\tau)$. Les appuis ne varient pas avec $\tau°$.

Mais je suppose de plus que, pour une cause étrangère à $\tau°$, ces appuis se déplacent : horizontalement de ξ, ξ', verticalement de η, η'.

Le triangle primitif $A_0 B_0 C_0$ devient $A_1 B_1 C_1$.



Art. 2. — Conventions pour les signes.

τ est > 0 pour les élévations de température, < 0 pour les abaissements.

ξ, ξ' sont > 0 dans le sens Ox ; η, η' sont > 0 dans le sens Oy.

Les rotations sont > 0 de Ox vers Oy.

Art. 3. — Calcul des rotations $\delta\psi_0$, $\delta\psi'_0$.

ψ_0 est l'angle dont il faut faire tourner A_0x' dans le sens des rotations positives pour l'appliquer sur A_0B_0.

ψ'_0 est l'angle dont il faut faire tourner C_0x'' dans le sens des rotations positives pour l'appliquer sur C_0B_0.

Projetons sur l'horizontale, puis sur la verticale, le contour $A_0A_1B_1C_1C_0A_0$.

$$(1)\quad \left\{ \begin{array}{l} \xi + l_0(1+\alpha\tau)\cos(\psi_0+\delta\psi_0) - l'_0(1+\alpha\tau)\cos(\psi'_0+\delta\psi'_0) - \xi' - a'_0 - a_0 = 0. \\ \eta + l_0(1+\alpha\tau)\sin(\psi_0+\delta\psi_0) - l'_0(1+\alpha\tau)\sin(\psi'_0+\delta\psi'_0) - \eta' - b_0 + b'_0 = 0. \end{array} \right.$$

On avait, avant mouvement :

$$(2) \qquad a_0 = l_0 \cos \psi_0 \qquad a_0' = - l_0' \cos \psi_0'$$
$$b_0 = l_0 \sin \psi_0 \qquad b_0' = l_0' \sin \psi_0'$$

Développons (1) ; supprimons les infiniment petits du 2e ordre ; on trouve, en tenant compte de (2) :

$$(3) \quad \begin{cases} - b_0 \, \delta\psi_0 + b'_0 \, \delta\psi_0' = \xi' - \xi - \alpha\tau \, (a_0 + a_0') \\ a_0 \, \delta\psi_0 + a'_0 \, \delta\psi_0' = \eta' - \eta - \alpha\tau \, (b_0 - b_0') \end{cases}$$

D'où :

$$(4) \quad \begin{cases} \delta\psi_0 = \dfrac{a'_0 (\xi - \xi') - b'_0 (\eta - \eta') - \alpha\tau \, [b'_0 (b_0 - b'_0) - a'_0 (a_0 + a'_0)]}{a'_0 \, b_0 + a_0 \, b'_0} \\ \delta\psi'_0 = \dfrac{- a_0 (\xi - \xi') - b_0 (\eta - \eta') - \alpha\tau \, [a_0 (a_0 + a'_0) + b_0 (b_0 - b'_0)]}{a'_0 \, b_0 + a_0 \, b'_0} \end{cases}$$

Art. 4. — Mouvements de l'articulation de clef (f_{28}).

1° vertical h_1. — On a :

$$b_0 + h_1 = \eta + b_0 + \delta b_0 = \eta + l_0 (1 + \alpha\tau) \sin (\psi_0 + \delta\psi_0) = \eta + b_0 + a_0 \, \delta\psi_0 + \alpha\tau b_0$$

d'où :

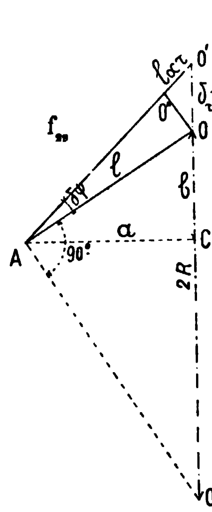
$$h_1 = \eta + a_0 \, \delta\psi_0 + \alpha\tau \, b_0$$

2° horizontal k_1. — On a :

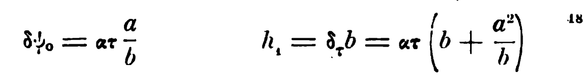
$$a_0 + k_1 = \xi + a_0 + \delta a_0 = \xi + l_0 (1 + \alpha\tau) \cos (\psi_0 + \delta\psi_0) = \xi + a_0 - b_0 \, \delta\psi_0 + \alpha\tau \, a_0$$

d'où :

$$k_1 = \xi - b_0 \, \delta\psi_0 + \alpha\tau \, a_0$$



Si les 2 appuis sont au même niveau ($b_0 = b'_0 = b$), symétriques ($a_0 = a'_0 = a$), et fixes ($\xi = 0$, $\eta = 0$; $\xi' = 0$, $\eta' = 0$), on a :



$$\delta\psi_0 = \alpha\tau \frac{a}{b} \qquad h_1 = \delta_\tau b = \alpha\tau \left(b + \frac{a^2}{b}\right) \quad {}^{48}$$

$\delta_\tau \, b$ (f_{29}) est la somme de :

$b \, \alpha\tau$ dilatation de la montée b ;

$\dfrac{a^2}{b} \alpha\tau$ augmentation de montée due à ce que a ne peut s'allonger de $a \, \alpha\tau$ (c'est la dilatation de la longueur $\dfrac{a^2}{b}$, rayon de courbure de l'ellipse de 1/2 axes a et b).

$\delta_\tau \, b$ peut aussi s'écrire :

$$2 \, \alpha\tau \, \frac{a^2 + b^2}{2 \, b} = 2 \, \alpha\tau \, R \quad {}^{49}$$

C'est la dilatation du diamètre OO_1 (f_{29}).

48. — Dans ce cas simple, il est facile d'établir directement ces formules (f_{29}).
Le sommet O vient d'abord en O" en tournant de $\delta\psi$ autour de A ; puis, par l'allongement $l\alpha\tau$, vient en O' sur la verticale de O :

$$O''O' = l \, \alpha\tau \qquad OO'' = l \, \delta\psi$$

Confondons l'arc avec sa tangente. L'angle O"OA est droit. Les triangles OO"C et AOC sont semblables (les angles O"OA, OO"O' sont droits, et les angles en O et A ont leurs côtés perpendiculaires).

$$\frac{l \, \alpha\tau}{b} = \frac{l \, \delta\psi}{a}, \quad \text{d'où } \delta\psi = \frac{a \, \alpha\tau}{b} ; \qquad \frac{\delta_\tau \, b}{l} = \frac{l \, \alpha\tau}{b}, \quad \text{d'où } \delta_\tau \, b = \frac{l^2 \, \alpha\tau}{b}$$

49. — Les 2 triangles rectangles OO"O' et AOO₁ sont semblables :

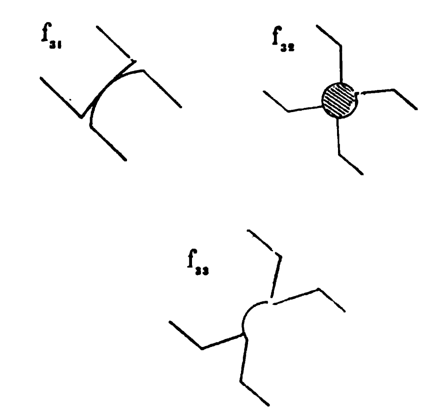
$$\frac{\delta_\tau \, b}{2R} = \frac{l \, \alpha\tau}{l} = \alpha\tau, \quad \text{d'où } \delta_\tau \, b = 2 R \, \alpha\tau$$

Art. 5. — Formules

Rotations autour des appuis et mouvements de la clef

pour un changement de température τ et un déplacement des appuis (f_{30}).

		Naissances dénivelées $b_o \gtrless b'_o$ — Appuis déplacés de $\xi, \eta\,;\ \xi', \eta'$. — $a_o \gtrless a'_o$	Naissances au même niveau ($b_o = b'_o = b$) — Appuis déplacés de $\xi, \eta\,;\ \xi', \eta'$ — $a_o \gtrless a'_o$	Naissances au même niveau ($b_o = b'_o = b$) — Appuis déplacés de $\xi, \eta\,;\ \xi', \eta'$ — $a_o = a'_o = a$	Naissances au même niveau ($b_o = b'_o = b$) — Appuis fixes $\xi = 0\ \xi' = 0\ \eta = 0\ \eta' = 0$ — $a_o = a'_o = a$
Rotations	$\delta\psi_o =$	$\dfrac{a'_o(\xi-\xi') - b'_o(\eta-\eta') + \alpha\tau\,[a'_o(a_o+a'_o) - b'_o(b_o-b'_o)]}{a'_o b_o + a_o b'_o}$	$\dfrac{a'_o(\xi-\xi') - b(\eta-\eta')}{b(a_o+a'_o)} + \alpha\tau\dfrac{a'_o}{b}$	$\dfrac{\xi-\xi'}{2b} - \dfrac{\eta-\eta'}{2a} + \alpha\tau\dfrac{a}{b}$	$\alpha\tau\dfrac{a}{b}$
	$\delta\psi'_o =$	$\dfrac{-a_o(\xi-\xi') - b_o(\eta-\eta') - \alpha\tau\,[a_o(a_o+a'_o) + b_o(b_o-b'_o)]}{a'_o b_o + a_o b'_o}$	$\dfrac{-a_o(\xi-\xi') - b(\eta-\eta')}{b(a_o+a'_o)} - \alpha\tau\dfrac{a_o}{b}$	$-\dfrac{\xi-\xi'}{2b} - \dfrac{\eta-\eta'}{2a} - \alpha\tau\dfrac{a}{b}$	
Mouvements de la clef	vertical $h_1(\uparrow +) =$	$\eta + \dfrac{a_o[a'_o(\xi-\xi') - b'_o(\eta-\eta')]}{a'_o b_o + a_o b'_o} + \alpha\tau\left\{\dfrac{a_o[a'_o(a_o+a'_o) - b'_o(b_o-b'_o)]}{a'_o b_o + a_o b'_o} + b_o\right\}$	$\eta + \dfrac{a_o[a'_o(\xi-\xi') - b(\eta-\eta')]}{b(a_o+a'_o)} + \alpha\tau\left[\dfrac{a_o a'_o}{b} + b\right]$	$\dfrac{a(\xi-\xi')}{2b} + \dfrac{\eta+\eta'}{2} + \alpha\tau\left(\dfrac{a^2}{b} + b\right)$	$\alpha\tau\left(\dfrac{a^2}{b} + b\right)$
	horizontal $k_1(\overset{\rightarrow}{+}) =$	$\xi - \dfrac{b_o[a'_o(\xi-\xi') - b'_o(\eta-\eta')]}{a'_o b_o + a_o b'_o} - \alpha\tau\left\{\dfrac{b_o[a'_o(a_o+a'_o) - b'_o(b_o-b'_o)]}{a'_o b_o + a_o b'_o} - a_o\right\}$	$\xi - \dfrac{a'_o(\xi-\xi') - b(\eta-\eta')}{a_o + a'_o} - \alpha\tau\,(a'_o - a_o)$	$\dfrac{\xi+\xi'}{2} + \dfrac{b(\eta-\eta')}{2a}$	0



CHAPITRE IV

ARTICULATIONS A GENOU [50]

Un bloc convexe roule dans un bloc concave de rayon plus grand : c'est une articulation *roulante* (f_{31}).

Deux blocs concaves enserrent un tourillon de même rayon et glissent l'un et l'autre autour de lui : c'est une articulation *tournante* (f_{32}).

Deux blocs, l'un concave, l'autre convexe, de même rayon, tournent en glissant l'un dans l'autre (f_{33}) : c'est une articulation *à genou.*

TITRE IV

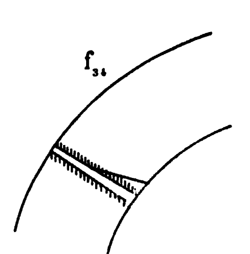
HISTORIQUE

ARTICULER LES VOÛTES EST UNE IDÉE FRANÇAISE

§ 1. — *C'EST DUPUIT QUI A ÉMIS LE PREMIER (EN 1870) L'IDÉE D'ARTICULER LES VOÛTES*

Il y a 43 ans, Dupuit écrivait : [51]

« ..... *il nous semble qu'on peut..... ramener la pression au centre du joint* « (de rupture) *par une disposition* (f_{34}) *qui consisterait à remplacer, du côté de* « *l'intrados, le prolongement du joint par une ligne faisant* « *avec celui-ci un angle très obtus raccordé par une courbe* « *sur laquelle roulerait la voûte au décintrement, si cette* « *partie du joint n'était garnie que d'étoupe. On déterminerait ainsi un point de passage obligé de la courbe de pression et qui la placerait comme on voudrait par rapport à* « *l'intrados; on pourrait faire quelque chose d'analogue à la* « *clef. Il n'y aurait plus alors rien d'indéterminé dans le* « *tracé de la courbe de pression, ce qui permettrait de la faire passer par le milieu* « *de tous les joints en faisant varier convenablement le poids de la voûte.... Il est* « *inutile que cette articulation se trouve précisément au joint de rupture, théoriquement elle aurait partout le même effet; mais de même qu'une ligne droite est* « *d'autant mieux déterminée par deux points qu'ils sont plus écartés entre eux, de* « *même il conviendrait ici d'éloigner ce point de passage de la clef et nous croirions* « *convenable de placer l'articulation dans un point accessible après le décintrement...*



50. — « *Umschliessungsgelenke* » des Ingénieurs allemands.

51. — « *Traité de l'équilibre des voûtes et de la construction des ponts en maçonnerie* » par J. Dupuit, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées, — Paris, Dunod, 1870, p. 195, 196, 197.

« La voûte étant ainsi construite, la rotation au moment du décintrement se « ferait nécessairement autour du point de contact, qu'on pourrait placer de 2 ou 3 « centimètres en arrière du centre du joint.... Il est évident que les deux pierres en « contact seraient dans des conditions bien plus favorables à la résistance que dans « le système de la pose ordinaire.... D'ailleurs,.... rien n'empêcherait de prendre « pour ces deux rangs de voussoirs des pierres d'une qualité excessivement dure..... « Remarquons même que la pose de ces deux voussoirs de chaque côté de la voûte « ayant pour résultat de faire passer la courbe de pression par le milieu de tous les « autres, permettrait d'employer pour ceux-ci des matériaux moins résistants que « ceux qu'on s'impose aujourd'hui dans l'indécision où on se trouve pour le passage « de la courbe de pression...

« Il n'est pas sans exemple,... dans les constructions publiques de voir des « pierres supportant des charges énormes ; dans les ponts métalliques les poutres ou « les arcs reposent sur les pierres des culées et des piles ;.... les portes gigantesques « des écluses à la mer, les ponts tournants reposent sur des pivots qui transmettent « leur pression à des pierres de taille. Ces pierres résistent parfaitement aux « pressions considérables qui leur sont transmises, parce que ces pressions ont lieu « seulement sur la partie centrale de leur surface. On pourrait d'ailleurs augmen- « ter cette résistance en intercalant au point de contact des plaques de fonte encas- « trées dans les deux voussoirs, de manière que la surface métallique remplacerait « celle de la pierre.... »

Dupuit a donc formellement prévu la réduction de surface des appuis [52], la triple articulation roulante, les sommiers en pierre dure, en fonte [53].

52. — En 1878, M. Brosselin. alors Ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées, proposait (*Note sur la construction des ponts en maçonnerie.* Paris 15 décembre 1878, Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées : C. 705, - 12538) de placer, à la clef et aux joints de rupture des voûtes, deux assises de voussoirs en pierre de taille résistante, d'y faire un joint de hauteur réduite à ciment pur, à mortier riche, au plomb, à l'étain.

Pour la voûte centrale du pont de Tolbiac à Paris, alors en projet (Portée, 35m20, montée, 8m25), il indiquait les épaisseurs de 0m75 à la clef, 0m90 au milieu de la montée ; voûte en meulière à ciment ; sommiers en pierre de taille de Souppes ; entre eux, joints en ciment pur sur la moitié de l'épaisseur de la voûte, travaillant : au décintrement, à 140 ou 150k ; aux épreuves, à 250 ou 300k.

Ces indications n'ont pas été suivies : les voûtes du pont de Tolbiac sont inarticulées.

Le projet de M. Brosselin a été rappelé dans deux mémoires :

1° - *Note sur la construction récente en Allemagne de ponts en maçonnerie avec articulations à la clef et aux joints de rupture* » par M. G. La Rivière, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Annales des Ponts et Chaussées, 1891, I, p. 899 à 940, Pl. 46 à 48.

2° - « *Ponts en maçonnerie, articulés aux naissances et à la clef* » par M. Bourdelles, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées.

Annales des Ponts et Chaussées, 1898, III, p. 31 à 92.

53. — Le Président Leibbrand l'a très explicitement reconnu. En raison de son importance, je donne ici le texte même de sa déclaration :

....

« Schon seit langer Zeit wurden deshalb von Dupuis (Dupuit) *andere Vorschläge gemacht, welche bewirken « sollten, dass die Resultante der inneren Kräfte in den Bruchfugen sich möglichst wenig von der Mitte « derselben entferne : die Abschrägung dieser Fugen, die geradlinige oder bogenförmige Erweiterung « derselben nach aussen ohne und mit gleichzeitiger Anbringung von Metalldollen zur Verhütung der « Verschiebung der Gelenksteine, die Verstärkung dieser Fugen durch bleibende Metalleinlagen von « einer Drehbewegung zulassenden Form, die Einlegung bleibender cylindrischer Eisengelenke, das « Einfügen provisorischer Eisengelenke, welche nach dem Auschalen des Gewölbes wieder beseitigt « werden sollten, wurden als Mittel zur Verhütung von Rissen und zur Festlegung der Druckkurven « bezeichnet... »*

Fortschritte der Ingenieurwissenschaften : « *Gewölbte Brücken* » von Karl Leibbrand, Leipzig, 1897, p. 42.

Traduction :

....

« Depuis longtemps déjà, d'autres propositions avaient été faites par Dupuit, pour arriver à ce que la « résultante des forces intérieures s'écartât le moins possible de l'axe aux joints de rupture, diminution « de ces joints par chanfreinage des arêtes, suivant des surfaces planes ou courbes, avec ou sans introduc- « tion de goujons métalliques pour empêcher le déplacement de l'articulation ; renforcement de ces joints « au moyen de dispositifs permanents en métal, de forme convenable pour permettre la rotation ; intro- « duction de rotules cylindriques permanentes en fer ou d'articulations métalliques provisoires à supprimer « après décintrement ; autant de moyens indiqués pour empêcher les fissures et fixer les courbes de « pression.... »

§ 2. — *APPLICATION EN ALLEMAGNE, APRÈS 1880, DE L'IDÉE DE DUPUIT*

C'est Köpcke de Dresde qui, en 1880, a exécuté les premières articulations roulantes [54] ; c'est le Président Leibbrand qui, en 1885, a articulé la première voûte sur plomb à Höfen [55] (Wurtemberg).

Les articulations tournantes ont été employées pour la première fois, en 1895, par M. Max Leibbrand au pont d'Inzigkofen [56].

TITRE V

CLASSEMENT DES VOÛTES ARTICULÉES

§ 1. — *CLASSEMENT DES VOÛTES ARTICULÉES SUIVANT LE TYPE D'ARTICULATION*

Quel que soit leur intrados, les voûtes articulées sont toujours en arc surbaissé entre leurs articulations de retombées.

Une voûte articulée en plein cintre, en ellipse, en arc peu surbaissé, est, en réalité, une voûte en arc surbaissé avec culées en surplomb.

Je conserverai les symboles des voûtes inarticulées pour désigner l'intrados, le nombre d'arches, la voie portée.

Mais, pour les voûtes articulées, le caractère dominateur n'est plus la courbe d'intrados : c'est le type d'articulation.

Elles seront donc classées d'abord d'après ce type, dans l'ordre suivant et avec les symboles que voici sous celui de l'intrados :

Bandes de plomb : ├──┼──┤

Articulations roulantes : ⊢─⊢─⊣

Articulations tournantes : o──o──o

Articulations à genou : (──)──)

§ 2. — *DISTINCTION ENTRE LES VOÛTES* « SEMI-ARTICULÉES » *C-A-D ARTICULÉES TEMPORAIREMENT, AU POIDS MORT SEULEMENT, LES ARTICULATIONS ÉTANT CONDAMNÉES AVANT L'OUVERTURE A LA CIRCULATION, ET LES VOÛTES* « ARTICULÉES » *C-A-D DE FAÇON PERMANENTE, SOUS LE POIDS MORT, LES SURCHARGES, POUR LES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE,....*

Dans nombre d'ouvrages on a, après achèvement et avant l'ouverture à la circulation, condamné les articulations.

La voûte est alors articulée seulement pour le poids mort.

54. — à un pont près de Langenhennersdorf (Saxe), ligne de Pirna à Bergiefshübler, - 3 voûtes en arc : portée, 13m ; montée, 3m ; épaisseurs : à la clef, 0m50 ; aux retombées, 0m60. — Rayons des surfaces en contact : 1105mm et 977mm.

(Zeitschrift des Architekten-und Ingenieur-Vereins zu Hannover, 1888, Heft 4, p. 374 à 380 : « *Uber die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben* » von Geh. Finanzrath C. Köpcke, zu Dresden.

55. — $\bar{A}^1$ rte ($\geqslant 40^m$)^1, Tome IV, Livre II

56. — $\bar{A}^1$ rte ($\geqslant 40^m$)^1, Tome IV, Livre II

La courbe de pression du poids mort passe par les articulations, mais les surcharges et les variations de température la déplacent.

Ces voûtes seront dites « *semi-articulées* ».

Elles ont les symboles des voûtes articulées, mais avec une barre sur le signe de l'articulation :

Bandes de plomb :

Articulations à genou : 

Ces voûtes, qui se rapprochent des voûtes inarticulées, seront décrites les premières.

§ 3. — *SÉRIES DANS LESQUELLES ONT ÉTÉ CLASSÉES LES VOÛTES ARTICULÉES* $\geqslant$ 40^m

Les voûtes à 3 articulations seront donc classées : d'abord en voûtes semi-articulées et voûtes articulées ; puis, dans chacune de ces divisions, d'abord d'après le type d'articulation ; enfin, comme les voûtes inarticulées, par intrados, nombre d'arches, voie portée.

Pour les voûtes de 40^m et au-dessus, voici les séries :

I. — Voûtes $\geqslant$ 40^m semi-articulées,

c'est-à-dire articulées temporairement, au poids mort seulement, articulations condamnées avant l'ouverture à la circulation.

Types d'articulations	Ponts en arc très surbaissé — à une seule grande arche — sous route	Ponts en arc très surbaissé — à une seule grande arche — sous chemin de fer à voie normale	Ponts en arc très surbaissé — à plusieurs grandes arches sous route
sur plomb	A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)	»	»
à genou	A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)	A^1 F^r ($\geqslant 40^m$)	A^n r^{te} ($\geqslant 40^m$)

II. — Voûtes $\geqslant$ 40^m articulées,

c'est-à-dire de façon permanente, sous le poids mort, les surcharges, pour les variations de température,...

Types d'articulations	Ponts en ellipse — à plusieurs grandes arches — sous chemin de fer à voie normale	Ponts en arc peu surbaissé — à une seule grande arche — sous chemin de fer à voie normale	Ponts en arc très surbaissé — à une seule grande arche — sous route	Ponts en arc très surbaissé — à une seule grande arche — sous chemin de fer à voie normale	Ponts en arc très surbaissé — à plusieurs grandes arches sous route
sur plomb	E^n F^r ($\geqslant 40^m$)	»	»	»	»
roulantes	E^n F^r ($\geqslant 40^m$)	A^1 F^r ($\geqslant 40^m$)	A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)	A^1 F^r ($\geqslant 40^m$)	A^n r^{te} ($\geqslant 40^m$)
tournantes	»	»	A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)	»	»

LIVRE II

DESCRIPTION DES PONTS

QUI ONT OU AVAIENT

DES

VOÛTES ARTICULÉES

DE 40^{m} ET PLUS DE PORTÉE

TABLEAUX SYNOPTIQUES

MONOGRAPHIES

LIVRE II

DESCRIPTION DES PONTS

QUI ONT OU AVAIENT

DES

VOÛTES ARTICULÉES

DE 40^m ET PLUS DE PORTÉE

TABLEAUX SYNOPTIQUES

MONOGRAPHIES

VOÛTES

SEMI-ARTICULÉES

C'EST-A-DIRE ARTICULÉES TEMPORAIREMENT
AU POIDS MORT SEULEMENT

ARTICULATIONS CONDAMNÉES
AVANT L'OUVERTURE A LA CIRCULATION

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES [1]

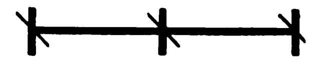
ARTICULATIONS

SUR

PLOMB



Symbole : [1]

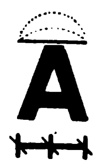


1. — Pour cette définition et le sens du symbole, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS SUR PLOMB [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

 [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série A[1] r[te] (⩾ 40m) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	ENSEMBLE Largeurs { entre parapets / *entre tympans* *sous la plinthe* } Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES { Clef / *Retombées* } 5	BANDES DE PLOMB *Épaisseur* Largeur { Clef / *Retombées* } *Pour les pressions, voir Tome IV, Livre III.* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg/$\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATIONS DES TÊTES* 9
de **Höfen** *Wurtemberg* 1885 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m)1	*35^{m}60* 20^{mm} 5^{m}85	{ 3^m,90 / *3^{m}40* } Pas de fruit 0^{m}55	Sur le sol de fondation, Portée : **41^m,00** Au-dessus du sol, Arc de cercle **28^m,00** *2^{m}80* $\frac{1}{10}$ = 0,10 *36^{m}40*	{ 1^m,00 / *1^m,50* }	*20^{mm}* { 35^{cm} / *50^{cm}* }	PT [1] Grès (917^k à 1036^k) *Ciment Portland de Blaubeuren* *0^{mc}666*	Pressions maxima : Clef : 29^k Joint de rupture : 22^k Retombées : 24^k	1° Aux reins, 6 voûtes transversales vues, en plein cintre de 1^{m}40, sur piles de 0^{m}70. Au cerveau, évidement longitudinal 2° »
de **Marbach** *Wurtemberg* 1886–1887 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m)2	*41^{m}70* 20^{mm} 20^{mm} 7^{m}55	{ 6^m 20 / *5^{m}60* } Pas de fruit 0^{m}55	Sur le sol de fondation, Portée : **43^m,50** Au-dessus du sol, Arc de cercle **32^m,00** *3^{m}10* $\frac{1}{10,32}$ = 0,097 *42^{m}84*	{ 1^m,20 / *1^m,50* }	*22^{mm}* { 40^{cm} / *50^{cm}* }	Bandeaux : PT [1] Keuper (577^k à 644^k) Douelle et Queutage : MEV [1] Muschelkalk résistant mal à la gelée et à l'humidité (992^k à 1169^k) Sommiers d'articulations : Grès (718^k à 768^k) *Ciment — 0^{mc}500*	Pressions maxima : Clef : 27^k Joint de rupture : 25^k	1° Les tympa[ns] et 2 murs longitudina[ux] de 0^{m}50 écartés de 1 portent une plate-forme en béton à 1^r, 2^r, 3^r. 2° »
de **Baiersbronn** *Wurtemberg* 1889 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m)3	*38^{m}50* 5^{mm} 5^{m}50	{ 6^m,60 / *5^{m}81* } Pas de fruit »	Sur le sol de fondation, Portée : **40^m,00** Au-dessus du sol, **33^m,00** *3^{m}30* $\frac{1}{10}$ = 0,10 »	{ 0^m,60 / *0^m,80* }	*20^{mm}* { 17^{cm} / *18^{cm}* }	PT [1] Grès bigarré (675^k)	Pressions maxima : Clef : 42^k Joint de rupture : 53^k Retombées : 33^k	1° 3 voûtes longitudinales de 1^{m}07, sur murs de 0^{m}50 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

SÉRIE $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

TABL

EXÉCUTION

FONDATIONS *ature du sol* Profondeur ous l'étiage Pressions sur le sol n kg/0^m01^2 *Procédé*	GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Ecartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle[2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v
10	11	12	13	14	15	16	17
Grès bigarré dur — 2^m Pression maxima : 9^k *Épuisements dans des batardeaux*	Fixe Montants et contrefiches » Boîtes à sable carrées, en fonte	3 *25cm* 1^m35 »	» » 5373^f	» » 56^f4	A pleine épaisseur à partir des retombées Joints bourrés, après la pose de chaque assise, de mortier à ciment 1^v sable 1^v5	Voûtes d'évidement en construction *35 jours* »	$t_c = 2^{mm}$ (moyenne des 2 têtes) sous le poids de tous les voussoirs amt / aval (mm) t'_v: 42.5 / 38 t''_v (à 28j.): 16.5 / 14.5 $t'_v+t''_v$: 59 / 52.5
Muschelkalk ur, compact, assisé — 2^m Pression maxima : 7^k »	Cintre du Pont de Teinach $\hat{A}^1 r^{te} (\geqslant 40^m)^2$ (Tome III) Fixe Montants et contrefiches » Boîtes à sable	5 *25cm* » »	» » 3147^f	» » 17^f3	2 rouleaux à partir des retombées. Joints en douelle bourrés après la pose de 4 assises à sec.	» *42 jours* »	$t_c = 72^{mm}$ $t'_v = 39^{mm}$ $t''_v = 16^{mm}$ jusqu'à l'achèvement du pont $t'_v+t''_v = 55^{mm}$
Granit » ression : 18^k »	Fixe Montants et contrefiches		» » 3201^f	» » 16^f2		» *28 jours* »	$t'_v = 92^{mm}$ $t'_v+t''_v = 163^{mm}$ *« par suite de fautes dans la confection des maçonneries »*

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations ×
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS SUR PLOMB
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

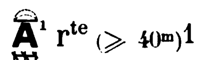
PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A¹ rte (⩾ 40m)

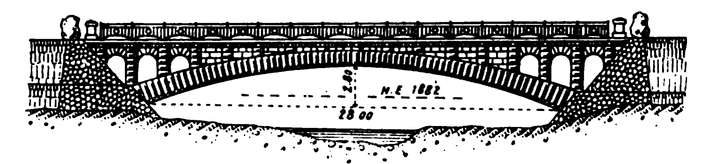
MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ENZ, EN AVAL DE HÖFEN[1] *(WURTEMBERG)*

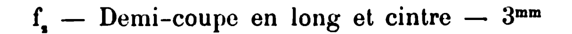
1885



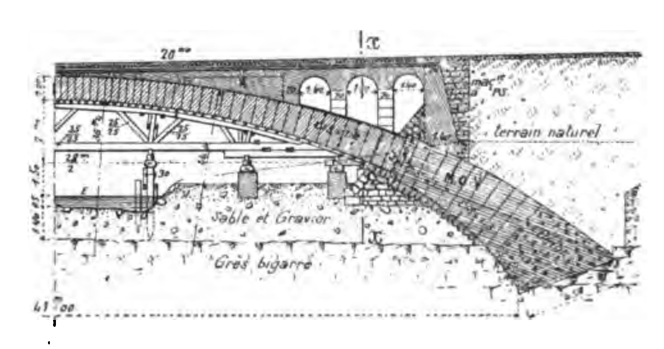
f₁ — Élévation — 2mm



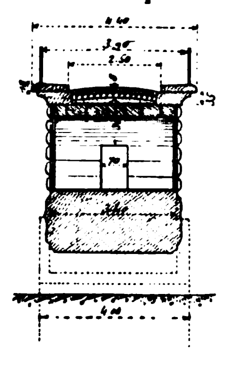
1. Articulations. — C'est un arc en maçonnerie à culées perdues, articulé, pendant sa construction, par des bandes de plomb de 20mm d'épaisseur, occupant le 1/3 central des joints de clef et de retombées.



f₂ — Demi-coupe en long et cintre — 3mm



f₃ — Coupe en travers sur *xx* de f₂ — 5mm



2. Trottoirs. — Ils sont en encorbellement sur consoles ancrées dans les tympans ; leurs bordures sont protégées par des fers cornières.

1. — Station de la ligne de Pforzheim à Wildbad, à 5k de Wildbad.

3. Chape. — Le dos de la grande voûte est revêtu de 3^{cm} de mortier de Portland à $1^r/2^r$; – les voûtes d'évidement, de 7^{mm} de feutre asphalté.

La chape, à deux pentes de 2% vers l'axe longitudinal, conduit l'eau sous un fer Zorès qui l'écoule derrière les culées.

4. Ciment employé. — A la traction, le mortier à 1^r de ciment de Blaubeuren pour 3^r de sable normal, après un jour sous l'eau et 6 jours à l'air, devait résister au moins à 8^k3 pour le ciment prompt (employé en fondations seulement), à 12^k4 pour le ciment lent.

5. Cintre. — On a employé les boîtes à sable carrées, en fonte, de 25^c de côté, du pont de Teinach [2].

Le sable, sec, était protégé par une feuille de fer-blanc ; il était, dans les boîtes, de 5^{mm} plus haut qu'au projet.

Les boîtes étaient reliées électriquement à la maison du gardien, qui eût été prévenu de suite d'une descente anormale.

6. Fondations. — Le bas des culées est en béton pilonné à $1^r/3^r/6^r$ (ciment et grès cassé), avec 30% de pierres (grès) posées suivant le rayon.

Le haut est en moellons ordinaires lités, avec 20% de mortier de ciment employé sec à $1^r/3^r$.

La douelle était appuyée sur une forme de pierres sèches recouverte de mortier de ciment.

7. Exécution de la voûte. — On chargea le cintre de tous les voussoirs : les appuis tassèrent de 1 et 3^{mm}.

Puis on posa les bandes de plomb des retombées [3] en soutenant leur bord inférieur par 3 chevilles scellées au plomb dans leur sommier, et saillant de 10^{mm}.

On bouchait le joint avec de l'étoupe.

On a construit la voûte en partant des retombées.

On posait une assise de voussoirs sur lattes en bois tendre de $15^{mm} \times 50^{mm}$; on lavait les joints ; puis, on y versait du mortier à l'état de fluide épais (1^r de ciment, $1^r 1/2$ de sable), et on l'y enfonçait avec des fers plats.

Aux têtes et en douelle, on bourrait les joints d'étoupe sur 3^{cm} de profondeur.

Pendant la pose des 5 assises voisines des retombées, le joint sec sur plomb s'élargit à l'extrados.

Les 5 dernières assises à la clef furent fermées en même temps.

Après clavage aux retombées, on coula du plomb dans les vides ouverts entre les bandes de plomb et leurs sommiers.

La voûte a été faite en 7 jours 1/4 par deux équipes de 4 maçons et 4 manœuvres.

2. — A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)2 — Tome III.

3. — Longueur 1^m05 ; intervalle entre les bandes 0^m10.

8. Décintrement. — Il fut fait en 3 fois par 21 hommes.

	Nombre de jours après clavage	Nombre d'abaissements de 3mm	Tassements totaux en *mm* amont	Tassements totaux en *mm* aval
1re opération	15	6	19,5	15,5
2e opération	28	3	30	26
3e opération	35	4	42,5	38

On n'observa pas de fissures.

On acheva les voûtes d'évidement, les tympans ; on posa le couronnement.

4 semaines après le décintrement, 9 semaines après le clavage, l'ouvrage étant terminé, le tassement atteignait : à l'amont, 59mm ; à l'aval, 52mm5.

Il n'a plus augmenté.

9. Variation en *mm* de l'épaisseur des lames de plomb (épaisseur initiale : 20mm) (augmentation + ; diminution —).

	Clef				Retombées							
Largeur des bandes :	*0m35*				*0m50*							
					Rive gauche				Rive droite			
	amont		aval		amont		aval		amont		aval	
	extr.	intr.	extr.	intr.	extr.	intr.	extr.	intr.	extr.	intr.	extr.	intr.
après clavage	+1	+3	−3	+4	+9	−8	+6	−1.5	+13	−6	+12	−2
au décintrement 1re opération	0	+1	−4	+4	+10	−8.5	+6	−3	+13	−7.5	+12	−3
au décintrement 2e —	0	+1.5	−4.5	+4	+10	−9	+6.5	−4	+13	−8	+12	−3.5
au décintrement 3e —	−1	+2.3	−5.5	+4.8	+10.5	−9.5	+6.5	−4.5	+13.6	−8.5	+12.4	−4.1
après achèvement du pont	−1.4	+2.3	−5.7	+4.7	+10.3	−9.5	+6.3	−4.6	+13.4	−8.9	+12.2	−4.3

A la clef, les bandes de plomb restèrent constamment en contact sur toute leur largeur avec les moellons.

Si le centre de pression est au 1/6 supérieur de la bande, la pression maxima est : sur l'arête supérieure, 124k ; sur la maçonnerie, 29k1.

Aux retombées, les bandes de plomb ne portaient plus à l'extrados et ne portaient que sur 35cm à l'intrados.

Dans le cas le plus défavorable, la pression maxima sur l'arête inférieure du plomb est 134k3, et, sur la maçonnerie, moins de 23k8.

10. Comment on a condamné les articulations. — L'ouvrage achevé, les joints vides ont été remplis de mortier de ciment.

11. Epreuves.

		Tassements à la clef en *mm*, le rouleau			
		passant vite		immobile	
		amont	aval	amont	aval
Rouleau compresseur..	vide : 5T4.......	0,2	0,3	0,15	0,15
	chargé : 11T....	de 0,4 à 0,65	de 0,4 à 0,8	0,35	0,35

Pas de tassement permanent.

12. Dépenses[4].

Fondations *(partie cachée)*	Fouilles et épuisements........................	4.178f	9.566f
	Béton et maçonnerie de moellons ordinaires lités	4.980f	
	Pierres sèches et divers........................	408f	
Élévation *(partie vue)*	Charpentes et cintres............................	5.373f	20.638f
	Maçonnerie....................................	11.542f	
	Garde-corps (43f le mètre-courant)............	2.295f	
	Plomb..	617f	
	Asphalte, fers (cornières des bordures, ancrage), divers..................................	811f	
	Dépense totale.........		30.204f

13. Personnel.

Projet : M. Leibbrand, « Kgl. Ober-Baurath ».

Travaux : *Direction générale :* M. Stuppel « Königl. Bauinspector » à Calw.
Conduite : M. Paul Braun, « Königl. Regierungs-Baumeister ».

4. — 1 Mark = 1f234.

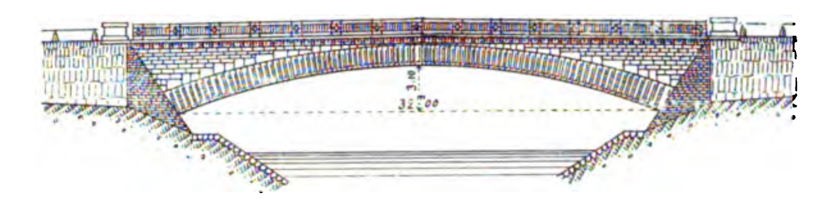
SOURCE :

S1. — Zeitschrift für Bauwesen 1888, p. 235 à 260, Pl. 38 à 40 : « *Steinbrücken mit « gelenkartigen Einlagen* » ; - p. 242 à 250, Pl. 38 : « *Brücke über die Enz bei Höfen* », - Stuttgart, novembre 1887, Leibbrand, Kgl. Ober-Baurath.

PONT sur la Murr, près de MARBACH[1] *(Wurtemberg)*

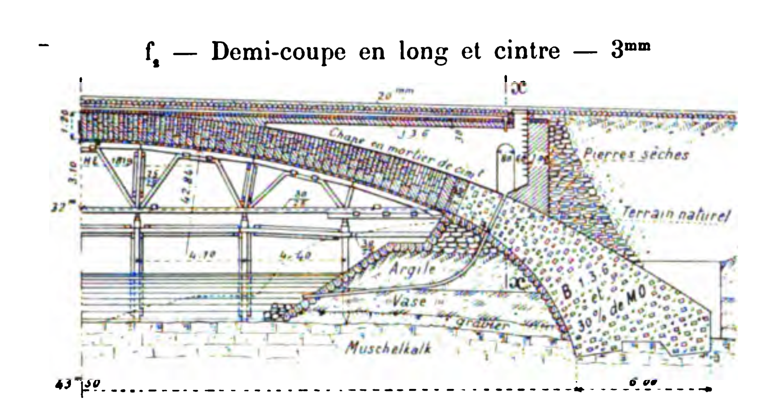
1886-1887 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)2

f_1 — Élévation — 2^{mm}



1. Articulations. — C'est un arc en maçonnerie à culées perdues, articulé, pendant sa construction, par des bandes de plomb de 22^{mm} occupant le 1/3 central des joints de clef et de retombées.

f_2 — Demi-coupe en long et cintre — 3^{mm}



f_3 — Coupe en travers sur xx de f_2 — 5^{mm}

2. Plinthes. — Les plinthes, en grès, sont en encorbellement sur consoles ancrées.

3. Chape. — On a étendu sur le dos de la voûte une couche de mortier à $1^v/2^v$; et, sur la plate-forme que portent les murs d'élégissement, un feutre asphalté de 7^{mm}.

4. Matériaux des culées. — Pour aller plus vite, on les a faites en béton (ciment 1^v, sable 3^v, pierre cassée calcaire et gros gravier 6^v, et 30 % de moellons calcaires).

Le béton résistait à la compression, à 5 mois, en cubes de 30^{cm} d'arête :	avec gravier	avec muschelkalk cassé au lieu de gravier
avec ciment { prompt (sous l'eau)	86^k à 107^k	»
avec ciment { lent (au-dessus de l'eau)	121^k à 135^k	119^k à 151^k

1. — Au confluent de la Murr et du Neckar. Station de la ligne de Bietigheim à Backnang, à 12^{km} de Bietigheim.

5. Cintre. — On a réemployé celui du pont de Teinach sur la Nagold[2], construit 5 ans avant.

Sous la moitié des matériaux de la voûte, il tassa irrégulièrement, soit parce que les bois étaient pourris, soit parce que ses appuis ont cédé.

On le déchargea, puis on le redressa.

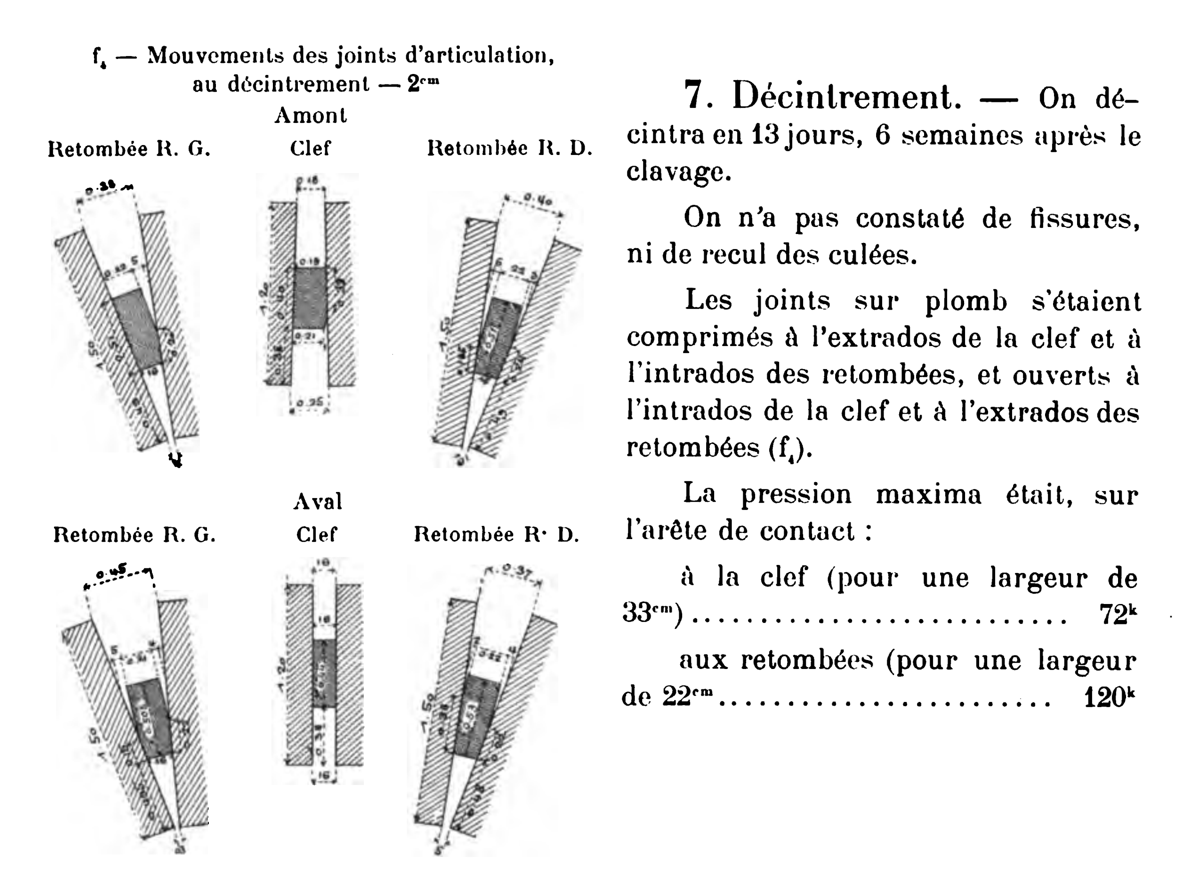
6. Exécution de la voûte. — A partir des retombées, la voûte a été construite en 21 jours en deux rouleaux.

En douelle, on posait 4 assises avec joints secs maintenus par des lattes de 20^{mm} ; puis on fichait du mortier (ciment 1^v, sable 2^v).

Le queutage est en moellons bien équarris.

Pendant la construction, le cintre tassa de 55^{mm}, et il se produisit, à la 1/2 voûte rive droite, quelques fissures que l'on boucha immédiatement.

f_4 — Mouvements des joints d'articulation, au décintrement — 2^{cm}



7. Décintrement. — On décintra en 13 jours, 6 semaines après le clavage.

On n'a pas constaté de fissures, ni de recul des culées.

Les joints sur plomb s'étaient comprimés à l'extrados de la clef et à l'intrados des retombées, et ouverts à l'intrados de la clef et à l'extrados des retombées (f_4).

La pression maxima était, sur l'arête de contact :

à la clef (pour une largeur de 33^{cm}) .... 72^k

aux retombées (pour une largeur de 22^{cm} .... 120^k

8. Comment on a condamné les articulations. — Deux semaines après le décintrement, les tympans construits, on coula du plomb dans les vides ouverts entre les bandes et les voussoirs, puis on ferma le reste du joint au mortier de ciment à $1^v/2^v$.

9. Dépenses[3].

Fondations *(partie cachée)*	Fouilles et épuisements	4.220f	10.803f
	Béton	6.583f	
Elévation *(partie vue)*	Cintre. — Pont de service	3.147f	29.229f
	Voûte	9.493f	
	Plomb	886f	
	Asphalte	390f	
	Garde-corps	2.345f	
	Maçonnerie au-dessus de la voûte	9.014f	
	Divers	3.954f	
	Dépense totale		40.032f

10. Personnel.

Projet : M. Leibbrand, « Kgl. Ober-Baurath ».

Travaux { Direction générale : M. Gulde, « Kgl. Bauinspector ».
Conduite : M. Fleischhauer, « Kgl. Regierungsbaumeister »

3. — 1 Mark = 1f234.

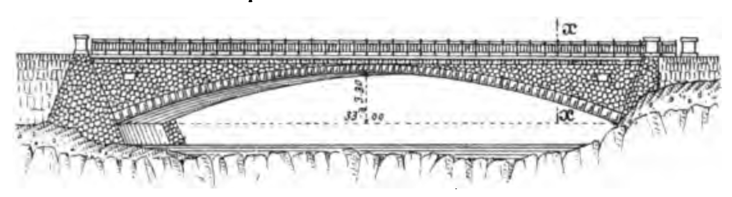
SOURCE :

S_1. — Zeitschrift für Bauwesen, 1888, p. 235 à 260, Pl. 38, 39, 40 : « *Steinbrücken mit « gelenkartigen Einlagen* » ; — p. 254 à 258, Pl. 40 : « *Brücke über die Murr bei Marbach* ». Stuttgart, novembre 1887, Leibbrand, Kgl. Ober-Baurath.

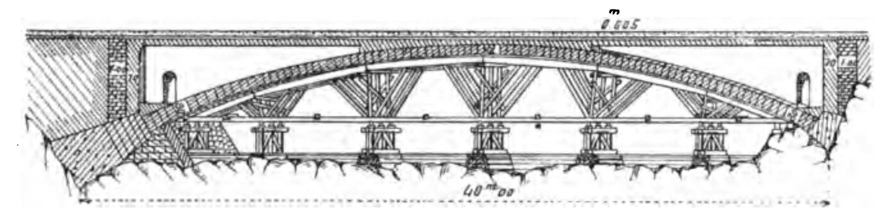
PONT SUR LA MURG, EN AVAL DE BAIERSBRONN[1] (*WURTEMBERG*)

1889 — A[1] r^{te} ($\geqslant$ 40^m)3

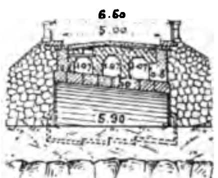
f_1 — Élévation — 2^{mm}



f_2 — Coupe en long et cintre — 2^{mm}5



f_3 — Coupe en travers sur xx de f_1 — 2^{mm}



1. — Station de la ligne de Freudenstadt à Klosterreichenbach, à 8k6 de Freudenstadt.

SOURCE :

S_1. — Fortschritte der Ingenieurwissenschaften, - Zweite Gruppe, 7 Heft ; « *Gewölbte* « *Brücken* », von Karl von Leibbrand, Präsident der K. Württ. Ministerial-Abteilung für den Strassen - und Wasserbau, Leipzig, 1897.

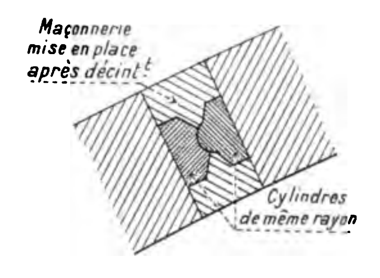
S'_1. — Tableaux statistiques, p. 50-51 et 52-53.

S''_1. — Dessins : Pl. I, fig. 6 à 10.

VOUTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS

A GENOU [1]



Symbole : [1]



1. — Voir Tome IV, Livre I :
p. 28, — pour la définition des voûtes « semi-articulées »,
p. 26, — pour la définition des articulations « à genou »,
p. 28 et 29, — pour le sens du symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
	Longueur entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	**INTRADOS** Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	**ÉPAISSEURS** CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	**ROTULES** *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	**MATÉRIAUX** *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	**PRESSIONS** en $kg/\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Munderkingen** *Wurtemberg* 1893 A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)1	*68^m59* 30^{mm} RG — RD 7^m20	8^m00 *7^m40* Pas de fruit 0^m50	Arc d'anse de panier à 3 centres Sur le sol de fondation, Portée : $59^m,00$ Au-dessus du sol : $50^m,00$ *5^m00* $\frac{1}{10}$ = 0,10 *Rayons :* *à gauche de la clef : 65^m* *à droite :* *Cerveau : 69^m70* *Reins : 40^m*	$1^m,00$ *$1^m,40$* 1^m10	Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle,	B 1 Ciment lent.... 1^v (Oberschwäbischen Cementwerke, Ehingen, Blaubeuren) Sable .... 2^v5 Gravier .... 5^v	Clef........ 35^k3 Joint de rupt. : RG 37^k9, RD 39^k2 Retomb. : RG 35^k5, RD 37^k0 » $400^k/m^2$	1° 2 étages de voûtes longitudinales de 0^m90, sur murs de 0^m60. 2° *Bandeaux en mortier de ciment coloré, à 1^v, 2^v.*

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

SÉRIE Â¹ r^te (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q**
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							DÉPENSE **D**
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4]
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	FERMES: Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES: Nombre *Épaisseur* Ecartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses: Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses: par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rive droite : *Rocher* » Pression normale : 15k » Rive gauche : *Gravier* » Pression verticale : MAX...... 3k moy ..... 2k1 horizontale : sans frottement : 3k5 avec frottement de 0,7 : 1k2 *Pilotis et Épuisements*	Fixe Montants et contrefiches » Coins en chêne à 1/12	5 *2.4c* 1m85 *120mm*	» » 8761f	» » 22f6	A pleine épaisseur 4 attaques Tranches de 1m à 1m50	» *28 jours* 4 septembre	(am^t / aval) t'_v 30mm / 38mm t''_v (136 j.) 72mm / 72mm (voir la monographie, p. 59) Mouvements des culées au décintrement (Recul / Tassement) RG 2mm à 6mm5 / 3mm5 à 4mm RD 3mm6 / 2mm	(Fondations / Élévation / Ensemble) D 17276f / 70338f / 87614f D : S_p 32f3 / 131f5 / 163f8 D : W 4f0 / 16f4 / 20f5

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, nº 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, nº 7 — *B*.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS A GENOU
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A¹ r^te (⩾ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LE DANUBE, A MUNDERKINGEN[1] (WURTEMBERG)

1893 A¹ r^te (⩾ 40m) 1

Φ₁ (S₂)

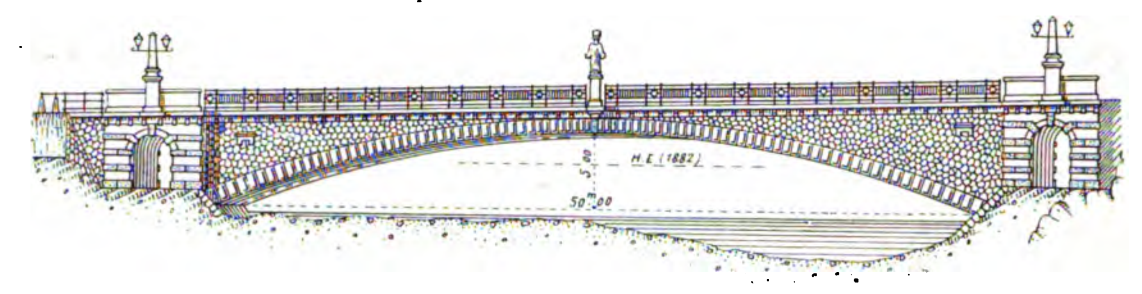


1. Pourquoi on a fait la voûte en béton. — Parce qu'on avait sur place du sable et du gravier excellents, — qu'on était près d'usines à ciment, — que l'arche est biaise (75°).

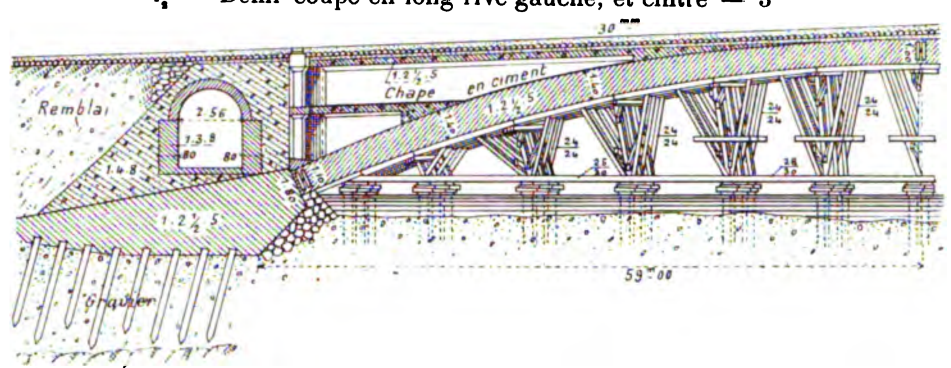
2. Courbes d'intrados et d'extrados. — Elles ont été définies par la condition que la fibre moyenne coïncidât avec la courbe de pression dans la voûte uniformément surchargée.

1. — Station de la ligne d'Ulm à Immendingen, à 44km9 d'Ulm.

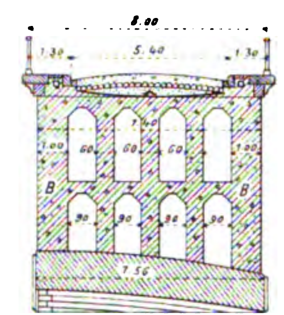
f_1 — Élévation amont — 2mm



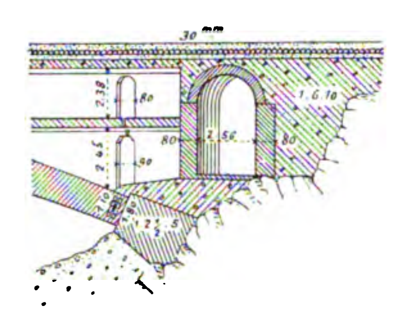
f_2 — Demi-coupe en long rive gauche, et cintre — 3mm



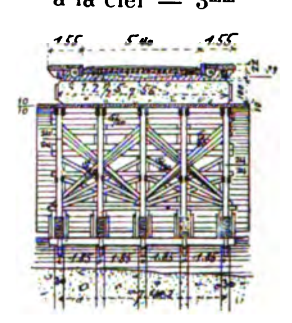
f_4 — Coupe en travers aux retombées — 4mm



f_3 — Culée rive droite — 3mm



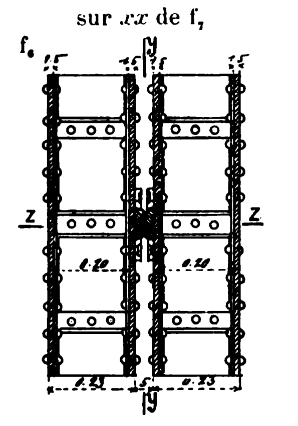
f_5 — Coupe en travers à la clef — 3mm



Rotule et Caisson

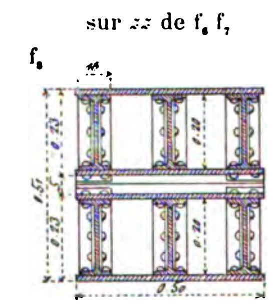
Coupes — 5cm

sur *xx* de f_7



sur *yy* de f_6

sur *zz* de f_6 f_7



Rotule

Coupe — 15cm

3. Articulations (f_6 à f_9). — Chaque charnière a 12 rotules de 0m50 de longueur, disposées en échelons à cause du biais.

Une rotule comprend deux pièces d'acier de 70mm de largeur, 25mm d'épaisseur, à surfaces de contact polies suivant des surfaces cylindriques de 15cm de rayon (f_9).

Elles sont encastrées dans des caissons en tôle (f_6 à f_8), appuyés sur des blocs de béton moulé de 110cm × 63cm.

Chaque rotule avec ses caissons coûte 142f et pèse : tôle d'acier doux, 385k; acier fondu, 16k.

Φ_2 (S_2)



4. Joints de dilatation dans les tympans. — Au-dessus des articulations des naissances, on a ménagé des joints vides, masqués par les pilastres en saillie des petites arches de rive. Ils sont recouverts sous la chaussée et sous les trottoirs par deux fers ┌ pouvant glisser l'un sur l'autre.

5. Parements. — Les têtes de la grande voûte sont crépies au mortier coloré en rouge. Les bandeaux des petites voûtes de rive, les consoles et les plinthes sont en béton moulé.

Tous ces parements jouent le grès rouge.

Les tympans sont en moellons calcaires, à joints incertains.

6. Chaussée et trottoirs. — Sur le béton (f_4), on a étalé une couche de ciment, puis 7mm d'asphalte ; dessus, du sable, puis l'empierrement.

Un fer en ⋂, posé sur la chape, conduit l'eau à la culée rive gauche, la plus basse.

Les trottoirs, asphaltés, sont en encorbellement de 0m30 sur consoles en béton moulé.

Le garde-corps est en fer (68k à 0m60 par mètre courant).

7. Matériaux.

A. Composition du béton.

			Composition en volume Ciment 1v — Sable	Gravier	Poids de ciment pour 1m³ de béton en œuvre
Béton damé	Fondations	sans blocs noyés	2v5	5v	238k
		avec 1/4 de blocs noyés	4	8	191
	Voûte	sans blocs noyés	2 5	5	253
		mortier de tête coloré	2		244
	Autres parties		3	6	250
			4	8	200
			5	10	164
Béton moulé	non coloré		2 5	5	407
	coloré	ciment ordinaire	2 5	5	302
		supplément de ciment coloré			20

Dans les fondations seulement, le béton a été fait à la main.

On a employé dans l'ouvrage 552 tonnes de ciment.

B. Béton de la voûte. — Le ciment à prise lente pour la voûte était moulu très fin : pas de résidu sur le tamis à 900 mailles par $\overline{0^m01^2}$, 15 % sur le tamis à 5000 mailles.

A 7 jours, le mortier à 1 pour 3 de sable normal résistait en moyenne à 29k à la traction.

D'après les essais, le meilleur dosage a été : 1 – 2,5 – 5.

Voici la résistance du béton ainsi dosé, sortant de la bétonnière :

Durée d'exposition à l'air	Arêtes des cubes essayés	Nombre d'expériences	Résistances à la compression, en Kg/$\overline{0^m01^2}$ — minima	maxima	moyenne
7 jours	10cm	10	146k	270k	209k
28 jours	10	10	208	326	262
5 mois	20	4	333	358	343
2 ans 7 mois	20	4	526	537	532

Le sable et le gravier étaient soigneusement lavés.

8. Fondations. — La culée rive gauche est fondée sur 145 pieux battus avec une inclinaison de 15°.

Sur le fond nettoyé, on a coulé, sous 0m50 d'eau, du béton à prise rapide ; puis, au-dessus de l'eau, le béton lent, tenu sec.

Chaque pieu porte : suivant son axe, 34T8 ; transversalement, en tenant compte du frottement du béton sur le sol (0,7), 10k3 par $\overline{0^m01^2}$ (1/12 de sa résistance transversale).

9. Exécution de la voûte. — On posa les rotules des naissances ; on chargea le cintre de 25 tonnes ; puis on pilonna le béton par couches de 30^cm, en tranches de 1^m à 1^m50, entre deux cloisons transversales ayant deux échelons à cause du biais.

Toutes les parois étaient recouvertes de gros papier huilé : en douelle et sur les têtes, étaient cloués des liteaux pour simuler des joints.

On bétonnait à partir des retombées, alternativement une tranche rive droite et une tranche rive gauche. On enlevait les cloisons 3 heures après le bétonnage.

Quand les faces bétonnées paraissaient sèches, on les enduisait de mortier de ciment pour les relier au béton suivant.

Lorsqu'on fut ainsi arrivé à 8^m des retombées, on établit sur le cintre, à 16^m des retombées, un appui permettant une nouvelle attaque qui a été poussée jusqu'à 2^m de la clef : on a ainsi construit en 4 tronçons.

Avant de couler le béton des têtes, on appliquait contre les cloisons de tête, une couche de 10^cm de mortier sec (ciment coloré 1^v, sable fin 2^v).

10. Mouvement des rotules des retombées. — Les abouts du cintre ayant tassé pendant la construction de 6^mm5 à 14^mm, les rotules d'acier furent déplacées.

On enleva le béton autour des caissons ; on boulonna entre eux les deux caissons d'une même rotule, et on les suspendit à la culée.

On boulonna de même entre elles les deux pièces des rotules de clef et on les maintint en place au moyen de coins en fer posés sur le cintre.

Après le clavage, on enleva les boulons pour permettre le jeu des rotules.

On avait mouillé le cintre pendant le bétonnage et on le laissa sécher après clavage. Pour le cas où une pluie l'aurait de nouveau gonflé, on l'abaissa, 10 jours après clavage, de 30^mm.

11. Tassements de la clef après le clavage.

Dates	Opérations	Température à 8h du matin	Abaissements totaux à la clef, en *mm* — observés		— ramenés à + 10°c [2]	
			amont	aval	amont	aval
1893						
7 août	Clavage	15°	»	»	»	»
17 —	Avant le 1er abaissement du cintre, de 30^mm	10°	23	7	23	7
22 —	Après — —	12°	43	40	45	42
4 septembre	Avant le 2e abaissement du cintre [3]	8°	45	34	43	32
	Après le décintrement complet	16°	75	72	82	79
19 —	»	12°	93	82	95	84
26 octobre	»	10°	127	122	127	122
1894						
18 janvier	»	−3°	147	144	133	130

2. — On a admis comme coefficient de dilatation du béton $8{,}8 \times 10^{-6}$. — Le mouvement vertical à la clef correspondant est de 1^mm1 pour 1° centigrade.

3. — Les coins (en chêne au 1/12e) descendirent très difficilement.

12. Comment on a condamné les articulations. — Le 26 octobre 1893, on condamna les articulations au mortier (ciment 1v, sable 2v).

13. Dépenses (non compris les abords).

Fondations	17.276f
Cintre	8.761f40
Pont proprement dit	49.853f60
Surveillance et divers	11.723f
Total	87.614f

14. Quelques prix d'unité. — Le mètre cube de béton a coûté :

comme fabrication	2f17
en œuvre	5f55

Le salaire d'un ouvrier était de 3f21.

15. Personnel.

Projet et Direction générale des Travaux : M. le Président Leibbrand.
Conduite des Travaux : M. Euting « Oberbaurath » à Stuttgart;
M. Braun « Strassenbauinspector » à Ehingen.
Entrepreneur : M. Max Buck, d'Ehingen.

SOURCES :

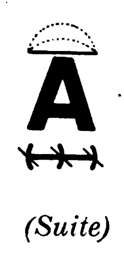
S_1. — Zeitschrift für Bauwesen, 1894, p. 541 à 558, Pl. 64 et 65 : « *Betonbrücke über die « Donau bei Munderkingen* », — Président Leibbrand, — Stuttgart, février 1894.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1908.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS A GENOU [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]



[1]

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série A[1] F^r (⩾ 40^m) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS { Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES { Clef *Retombées*	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en $kg/\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Morbegno** *Italie* 1902-1903 A[1] Fr (⩾ 40m)[1]	*117m 15* 0 12m56 étiage	{ 4m 50 *5m 00* Fruit : 1/20 1 06 jusqu'au-dessus du rail	Arc d'anse de panier à 3 centres { 70m,00 *10m 00* $\frac{1}{7}$ = 0,143 *Rayons :* *Cerceau : 74m sur 27° 31' 30"* *Reins : 50m696 sur 21° 53' 22"*	{ 1m,50 *2m,20*	Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle,	PT[1] Granit (1100k) *Ciment — 600k*	Pression maxima : sans surcharge / avec surcharge Clef : 38k4 (intr.) / 47k3 (extr.) Reins : 43k8 (extr.) / 55k4 (extr.) Retomb. : 29k5 (extr.) / 46k9 (extr.) avec refroidissement de 34° Clef : 69k4 (extr.) Reins : 70k1 (intr.) *Arc élastique* *Méthode Ritter* 5750k/1mc	1° 8 voûtes transversales vues, en plein cintre de 4m50, en béton sur piles de 1m10. On a articulé à la clef et aux reins celles au-dessus des articulations de retombée de la grande voûte. 2° *Archivolte*

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

A VOIE NORMALE — SÉRIE $\overset{\frown}{A}^{1}$ F[r] (⩾40m) — TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4]
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
	Type *Matière* Appareils de décintrement	{ Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]				
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rive droite : *Rocher* » » » Rive gauche : *Alluvion solide* » » *Béton :* *Portland* 400k *Sable* 1m³ *Gravier* 1m³7	Fixe Montants et contrefiches » Coins à 3 pièces	5 *25cm* 1m40 *120mm*			3 rouleaux A chaque rouleau, 10 tronçons limités au droit des montants du cintre. Joints secs au droit des autres points fixes.	» *28 jours* 4 mai	t'_v = 126mm	D = 364 000f D : S_p = 690f5 D : W = 74f6

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS A GENOU
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

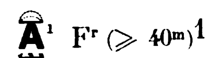
PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE A[1] F^r (⩾ 40^m)

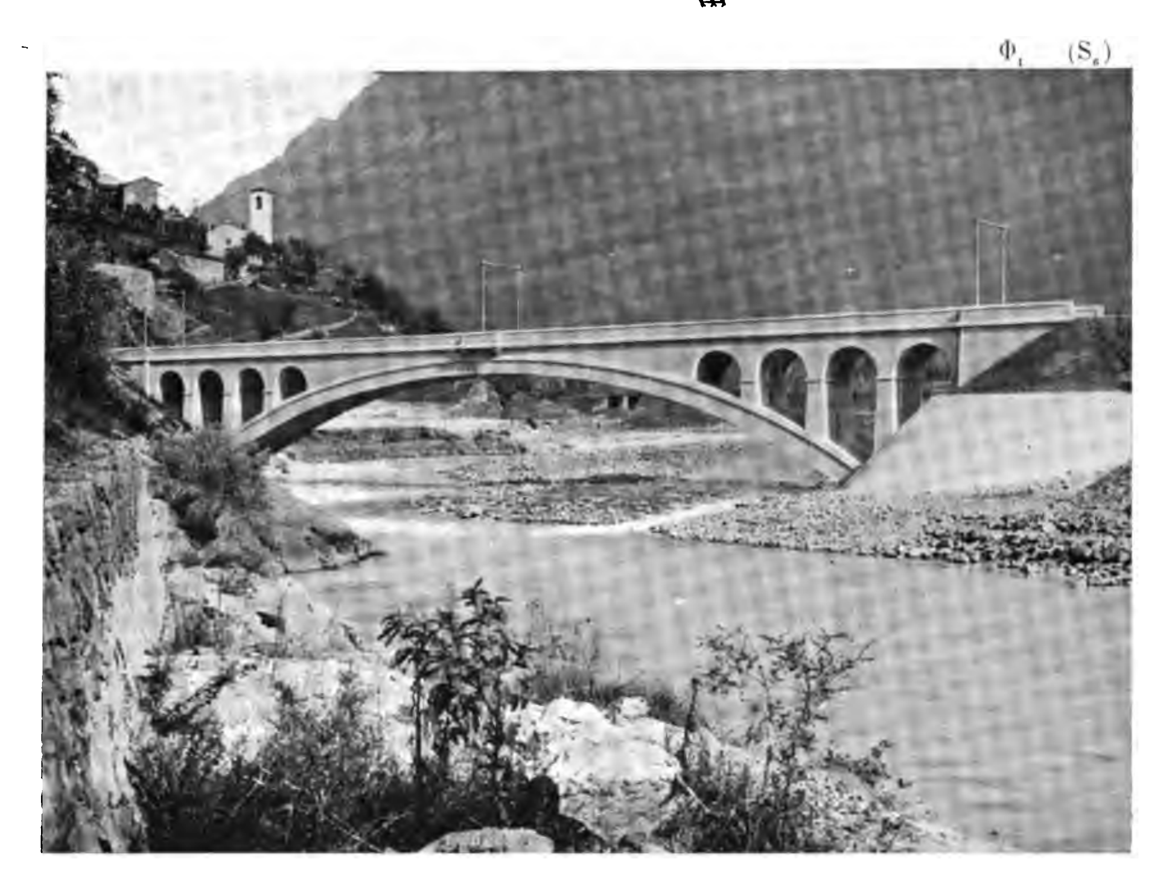
MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ADDA, PRÈS DE MORBEGNO *(ITALIE - Valteline)*

Ligne de Colico à Sondrio[1]

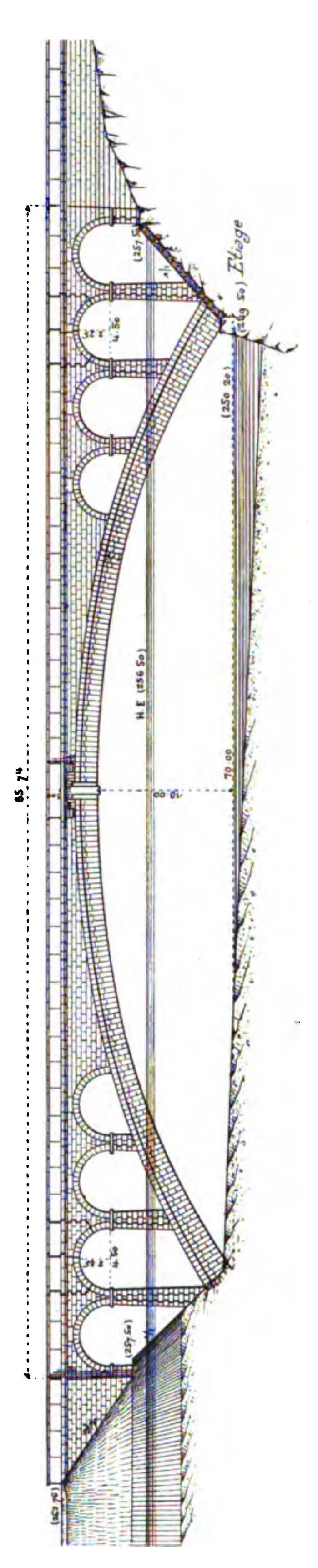
1902-1903 

Φ_1 (S_6)

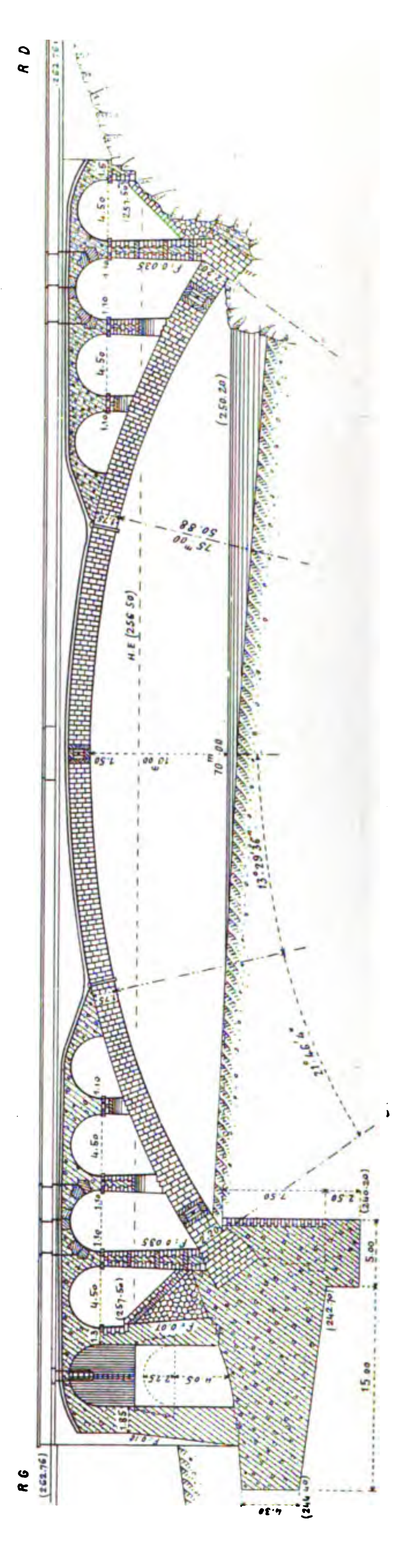


1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Parce que les crues de l'Adda, subites et violentes (S_3), auraient bousculé des fondations en rivière.

1. — Ligne électrique à 1 voie normale. — Le pont est au P[t] 19[k]979 (S''_4).



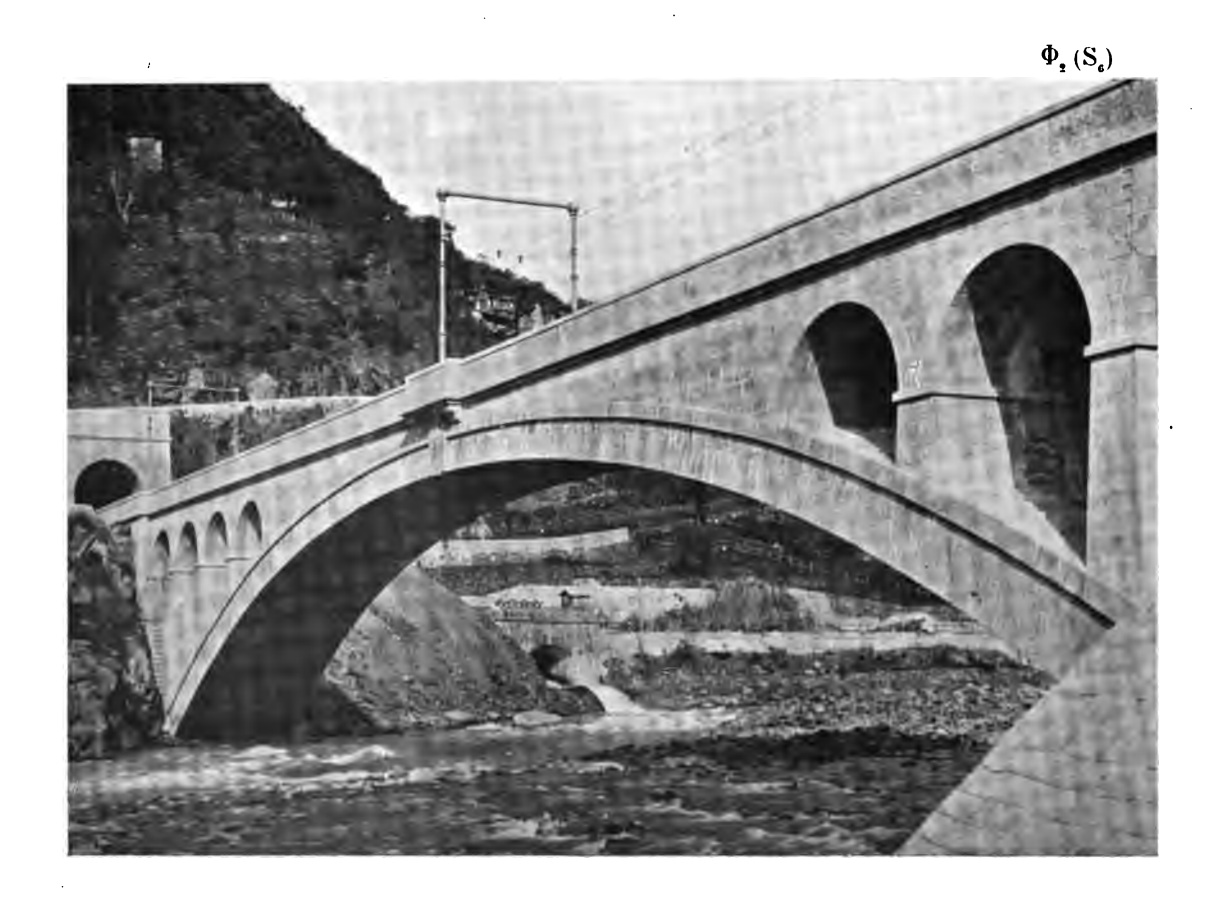
f_1 — Élévation, amont. — 2mm



f_2 — Coupe en long — 2mm

2. Aspect. — Le pont a même aspect général, même archivolte, que le pont Antoinette [2].

Φ_2 (S_6)



3. Intrados (S'₁).

		Projet	Exécution Clef surélevée de 120mm
Cerveau	Rayon de l'arc de cercle	75m	74m
	Amplitude	26°59'12"	27°31'30"
Reins	Rayon de l'arc de cercle	50m88	50m696
	Amplitude de chaque côté	21°46'4" (S'₁)	21°53'22"

4. Extrados. — Il est défini par la condition que la fibre moyenne soit la courbe de pression sous le poids propre (S_3).

L'épaisseur e de la voûte varie de 1m50 à la clef à 2m20 aux retombées, suivant la formule :

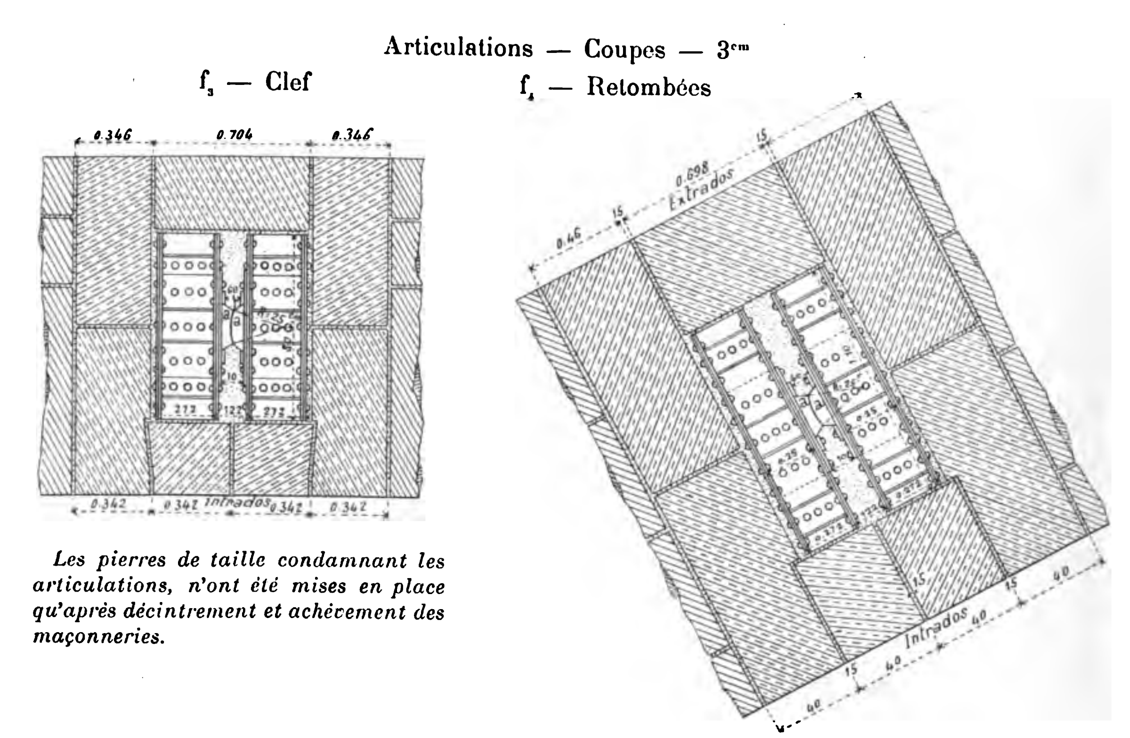
$$e = 1^m50 + 0,000841\, x^2 \qquad (S'_1)$$

2. — $\widehat{A}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)5 — Tome II.

5. Articulations. — Ce sont des blocs d'acier *a a* (f_3, f_4), à surface de contact cylindrique, pris dans des caissons en tôle.

Articulations — Coupes — 3ᶜᵐ

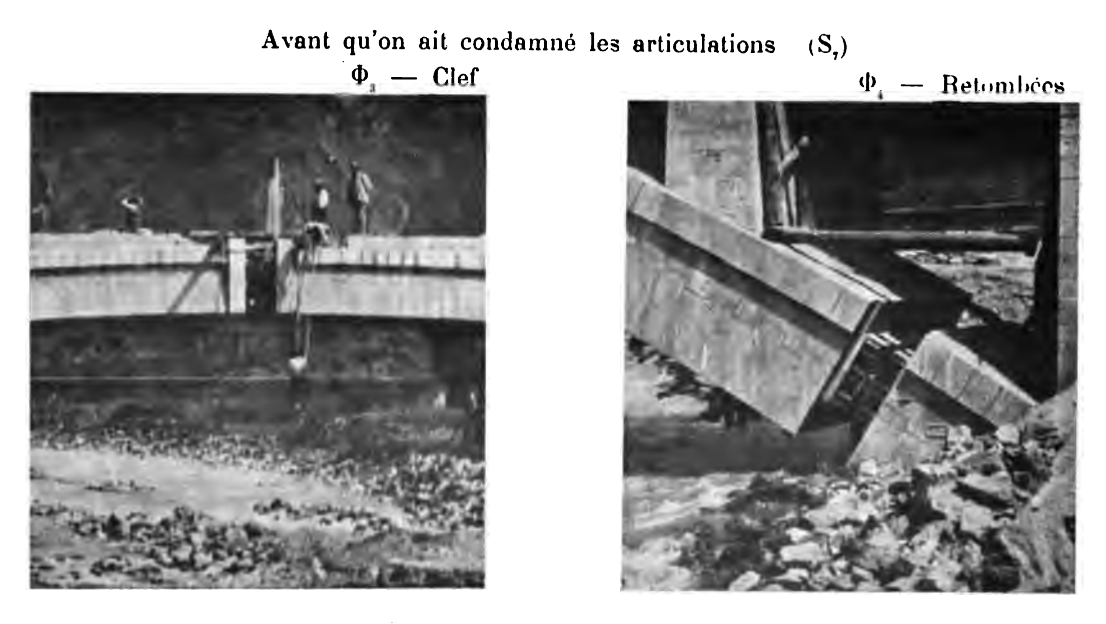
f_3 — Clef f_4 — Retombées



Les pierres de taille condamnant les articulations, n'ont été mises en place qu'après décintrement et achèvement des maçonneries.

Avant qu'on ait condamné les articulations (S_7)

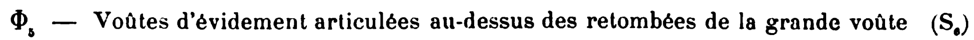
Φ_3 — Clef Φ_4 — Retombées



6. Dispositif permettant aux tympans de suivre les mouvements de la grande voûte (S'_1) (Φ_3 ; f_5, f_6). — Les voûtes d'évidement sont en béton (mortier de ciment à 600ᵏ, - 1ᵐᵉ7 de gravier) (S_3).

Celles au-dessus des articulations des retombées (les troisièmes à partir de la clef) sont elles-mêmes articulées à la clef et aux reins.

Les voussoirs de granit AA', BB', CC' (f_6), sont taillés en *j*, suivant deux surfaces cylindriques de 1^m555 et 1^m580 de rayon, roulant l'une sur l'autre.



Φ_5 — Voûtes d'évidement articulées au-dessus des retombées de la grande voûte (S_6)



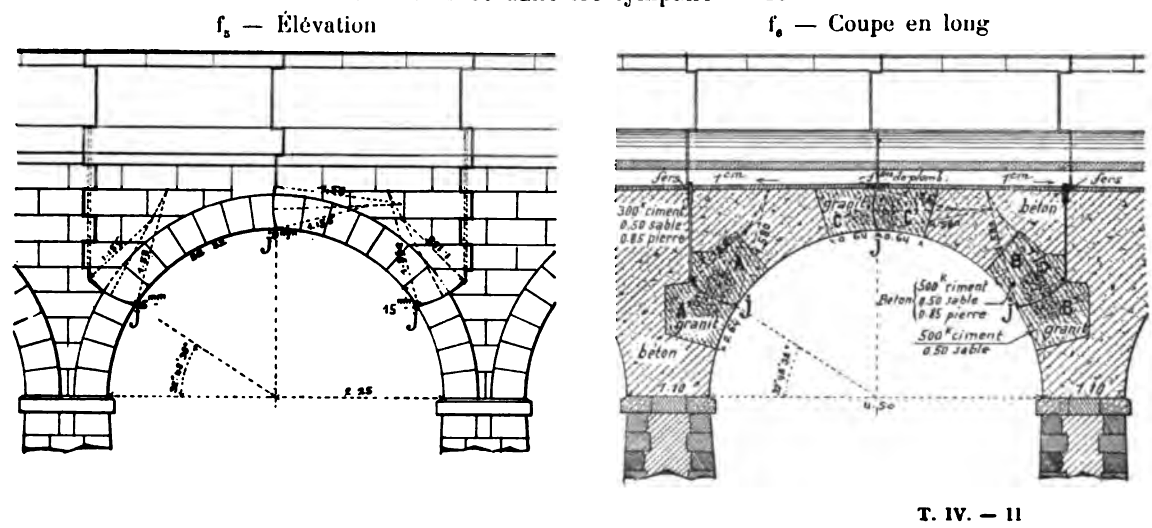
A *j* correspondent, dans les tympans et le couronnement, des joints de 20^{mm} laissés vides.

Ils sont fort apparents (Φ_5).

Articulations des voûtes d'évidement au-dessus des retombées de la grande voûte

Joints vides dans les tympans — 10^{cm}

f_5 — Élévation f_6 — Coupe en long



7. Calcul des efforts (f_7). — Comme les articulations n'ont été condamnées que le pont terminé, et avant le passage des trains, la voûte est articulée pour le poids mort, inarticulée (ou « encastrée ») pour les charges roulantes et les changements de température.

Pour chaque joint, on a placé la surcharge dans la position la plus défavorable.

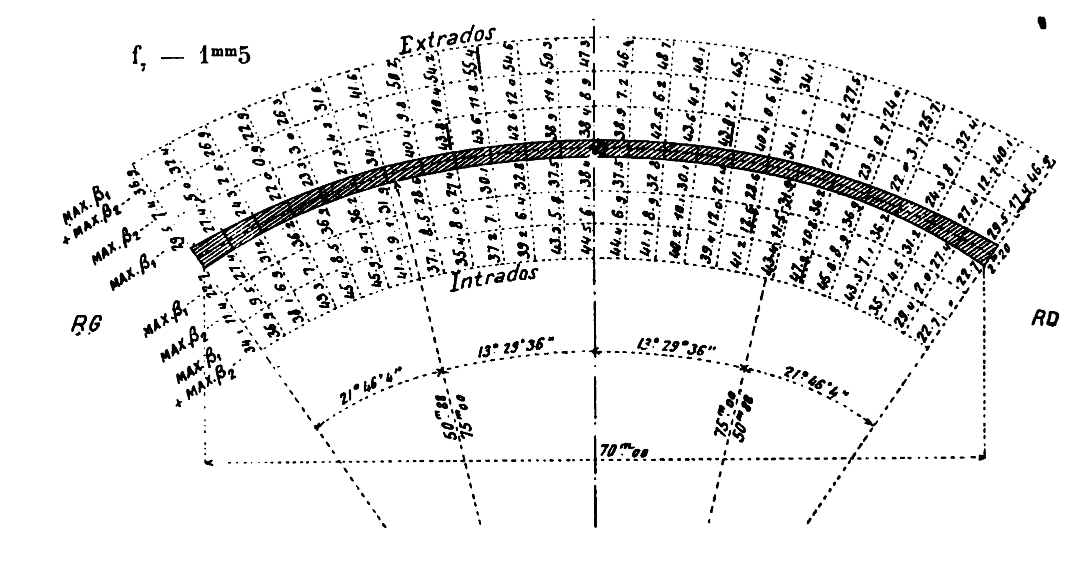
Le graphique f_7 résume les épures et les calculs.

Pressions maxima à l'intrados et à l'extrados, en kg/$\overline{0^m01}^2$.

MAX β_1 *sous la charge permanente,*

MAX β_2 *sous la surcharge roulante, dans la position la plus défavorable,*

MAX β_1 + MAX β_2 *sous la charge permanente et la surcharge roulante.*



Densités	Granit	2650k	Surcharge	Train de locomotives, longues de 15m65' pesant 90t, soit 5750k/1m (S"1).	
	Béton de ciment	2500k			
	Remplissage....	1800k			

8. Cintre (S'1, S"1) (f_8 à f_{12}). — Dans les pièces qui ne sont pas exposées à flamber, l'effort maximum est de 80k/$\overline{0^m01}^2$.

La pression sur le sommet des palées est de 52k.

Les coins de décintrement, à 3 pièces [3], étaient maintenus pendant l'exécution par la pièce *p* et l'arrêt B (f_{12}).

3. — Même dispositif qu'au Pont de Gloucester (1826-1827) E[1] rte ($\geqslant$ 40m)[4], Tome I.



Cintre

f_8 — Élévation — 2mm5

Appuis — 2cm

f_{10} Vue en long

f_{11} Vue en travers

f_{12} — Coins de décintrement — 5cm

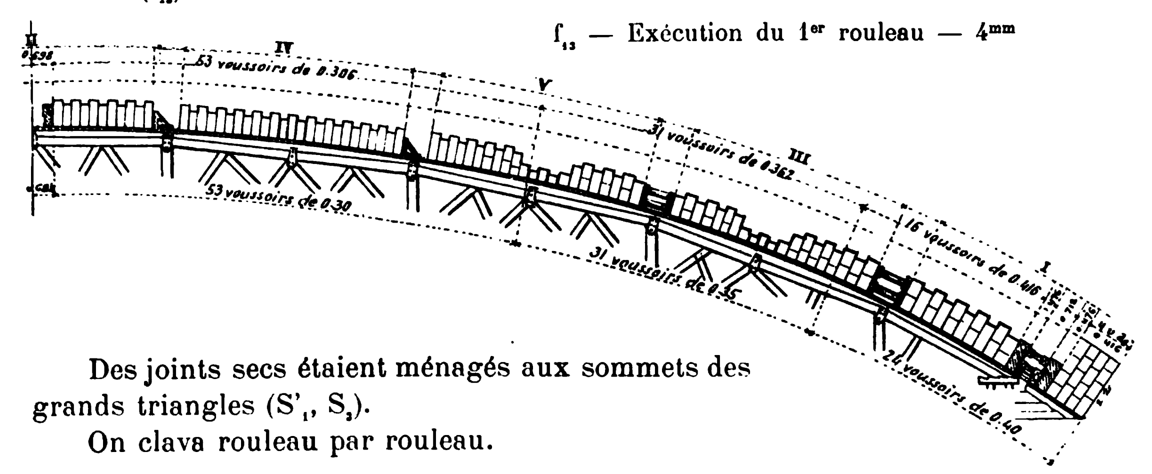
f_9 — Coupe en travers — 2mm5

9. Exécution de la voûte. — On l'a construite :

à pleine épaisseur, jusqu'aux articulations des retombées ;

au-dessus, en trois rouleaux de 10 tronçons chacun, limités, au droit des montants du cintre, par des coffrages vers les retombées, par des taquets au cerveau (f_{13}).

f_{13} — Exécution du 1er rouleau — 4mm



Des joints secs étaient ménagés aux sommets des grands triangles (S'_1, S_2).

On clava rouleau par rouleau.

10. Décintrement et achèvement. — On décintra le 4 mai 1903 (S_2, S_3).

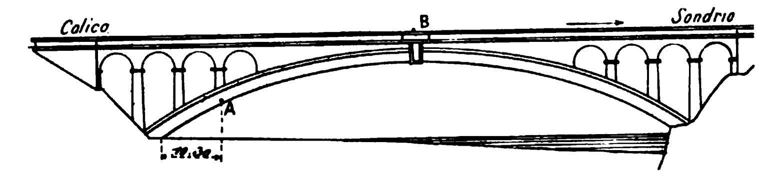
En août, on acheva les maçonneries au-dessus de l'extrados, et on condamna les articulations (S_3).

11. Epreuves (10 mars 1904) (S''_1). — On installa :

aux reins (A) (f_{14}), des verniers disposés verticalement et horizontalement ;

à la clef (B) deux fleximètres Trau (1 dans chaque niche).

f_{14} — Position des appareils de mesure — 1mm



Puis on fit passer un train de 5 locomotives dans le sens →.

Voici, en *mm*, les mouvements observés :

	Déplacements horizontaux	Déplacements verticaux
1° Aux reins (A) (f_{14})		
1/2 voûte Colico chargée	→ 0,3	↓ 1,3
Tout le pont chargé	0	↑ 0,7
1/2 voûte Sondrio chargée	← 0,1	↑ 0,9
Train passant en vitesse		passager ↓ 1mm6 permanent ↓ 0mm3
2° A la clef (B) (f_{14})		
Train passant en vitesse		passager ↓ 2mm (MAX)

Ces mouvements sont de l'ordre de ceux qu'on observe au décintrement.

12. Effet des changements de température.

A. - Mouvements de la voûte (f_{16} à f_{18}). — La voûte est dans l'air sur toute sa douelle et les 4/10 environ de son extrados.

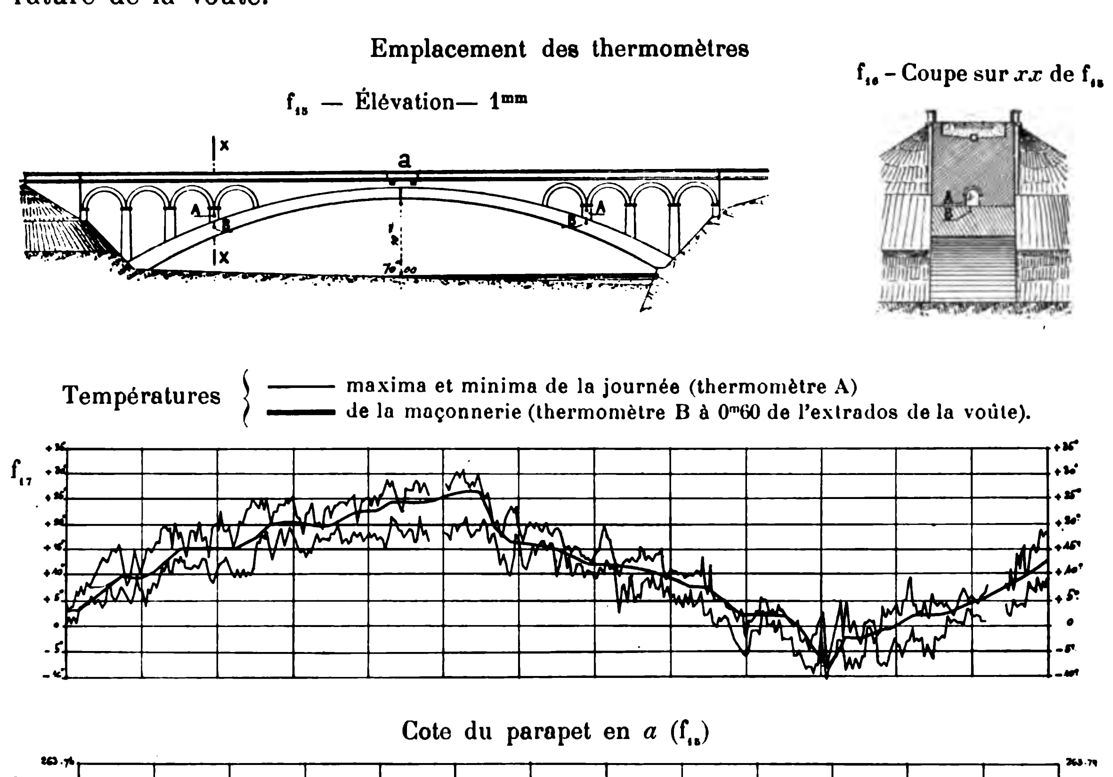
De mars 1904 à mars 1905, on releva chaque jour la température de la voûte et celle de l'air (S_4).

Les diagrammes (f_{16} à f_{18})[4] établissent ceci (S_4) :

1° - Le corps de la voûte est à la température moyenne des 24^h.

2° - Dans l'année, la variation totale fut de 34° (+26° le 15 août, — 8° au commencement de janvier).

3° - Les mouvements de la clef suivent exactement les variations de la température de la voûte.



La variation totale, de la première quinzaine d'août à la première quinzaine de janvier, a été de 33^{mm} (S_4).

M. le Professeur Guidi a calculé ce déplacement par les formules des arcs élastiques, avec le coefficient de dilatation déterminé par Bouniceau pour le granit, 8×10^{-6}.

4. — Gracieusement communiqués par M. le Commandeur Cajo, en janvier 1910.

Il a trouvé : Δb (en *mm*) $= 1{,}1\,\tau$

Soit, pour $\tau = 34°$: $\Delta b = 37^{mm}$. On a mesuré 33^{mm}.

Les résultats concordent.

Sous les variations de température, la voûte se comporte réellement comme un solide élastique.

On vient de voir qu'aux épreuves, la clef n'avait baissé que de 2^{mm} : c'est ce qu'aurait produit un refroidissement de 2°.

En janvier 1906, M. l'Ingénieur Figari constata près de chaque culée, au-dessus de la clef d'une voûte d'évidement, deux fissures de 3^{mm} [5] environ traversant des moellons de granit et montant jusqu'au parapet (S_5).

B. - Variation du travail par $\overline{0^m01^2}$. — M. le Professeur Guidi (S_4) a calculé, en supposant l'arc élastique, les efforts dans la voûte pour un refroidissement de 34° :

	Naissances		Clef	
	Intrados	Extrados	Intrados	Extrados
Il a trouvé	$+ 36^k$ compression	$- 39^k$ tension	$- 28^k$ tension	$+ 22^k$ compression
Sous l'action des surcharges, les efforts sont (S''_4) :				
Maximum	$+ 11^k4$			$+ 8^k9$
Minimum		$- 8^k6$	$- 2^k1$	
Ensemble (efforts limites sous la surcharge la plus défavorable, avec refroidissement de 34°).	$+ 47^k4$	$- 47^k6$	$- 30^k1$	$+ 31^k$
L'effort sous la charge permanente est (S''_4).	$+ 22^k7$	$+ 29^k5$	$+ 38^k4$	$+ 38^k4$
Effort résultant	$+ 70^k1$	$- 18^k1$	$+ 8^k3$	$+ 69^k4$

Si la voûte avait été clavée avec un écart de 34° par rapport au jour le plus froid, elle se serait, ce jour-là, ouverte aux reins de l'extrados.

13. Personnel [6].

Ingénieurs. — *Projet :* M. Giovanni Marro, aidé de M. Fausto Lolli.

(Bureaux de M. l'Ingénieur Rinaldo Rinaldi, Sous-Directeur général des Chemins de fer de l'Etat. — Direction des Travaux d'Ancône).

Direction des Travaux : M. Edouard Garneri, alors Chef de la section d'Entretien de Milan ; — M. Giovanni Raseri.

Entrepreneur : M. Carlo Bregani.

5. — Soit, pour les 4 fissures, environ 12^{mm}.

6. — Renseignements gracieusement communiqués, sur l'invitation de M. le Commandeur Cajo, par M. Ed. Garneri.

SOURCES :

S_1. — Società Italiana per le Strade Ferrate Meridionali, — Linea Colico-Sondrio « *Ponte in Muratura della luce di metri 70, sul fiume Adda presso Morbegno, al Km. 19 + 979* ».

S'_1. — Atlas de 11 planches.

S''_1. — Relazione dei Calcoli di Resistenza (Janvier 1904).

gracieusement adressés par M. le Commandeur Cajo, alors Directeur des Travaux à Ancône.

S_2. — Il Politecnico, mai 1903, p. 277 et suivantes, Pl. 22.

S_3. — Schweizerische Bauzeitung, 5 septembre 1903, p. 116 à 120 : « *Die neue steinerne « Addabrücke bei Morbegno der Eisenbahnlinie Colico-Sondrio* », A. Acatos, Ingenieur.

Le Génie Civil a donné une note extraite de S_3 (n° du 24 octobre 1903, p. 409 et 410) : « *Pont en maçonnerie sur l'Adda à Morbegno (Italie)* ».

S_4. — « *Influenza della temperatura sulle costruzioni murarie* » (Note de M. le Professeur Guidi, — Académie des Sciences de Turin, — Turin 1906).

S_5. — Il Politecnico, juin 1907 : « *Influenza della temperatura nelle costruzioni in « muratura, cemento e cemento armato* », p. 339 et suivantes. (Communication de M. l'Ingénieur L. Figari).

S_6. — Ce que j'ai vu — septembre 1904.

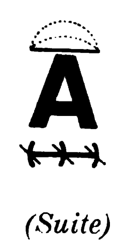
Sur l'invitation de M. le Commandeur Cajo, M. l'Ingénieur Fausto Lolli, de la Direction des Travaux d'Ancône, a bien voulu m'accompagner à Morbegno.

S_7. — Photographies que m'a très aimablement remises M. Fausto Lolli - septembre 1904.

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES [1]

ARTICULATIONS A GENOU [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]



[1]

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS ROUTE

Série A ^{n} r ^{te} (≥ 40^{m}) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE		PROJET — GRANDES VOÛTES					1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
	Longueur *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS { Portée / *Montée* / Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES { Clef / *Joints de rupture* / Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/$\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de la **Coulouvrenière** à **Genève** *Suisse* 1895-1896 Aⁿ rᵗᵉ (⩾ 40ᵐ)[1] *2 voûtes égales de 40ᵐ* *Entre elles, une arche de 10ᵐ80* *Sur la rive droite, une arche de 12ᵐ*	*150ᵐ* En profil en long, la chaussée est en courbe de 50ᶜᵐ de flèche 6ᵐ46 (RG) étiage	{ 18ᵐ00 / *18ᵐ70* Pas de fruit 0ᵐ75	{ 40ᵐ00 / *5ᵐ 40* / $\frac{1}{7,407} = 0,135$	{ 1ᵐ00 / *1ᵐ10* / 1ᵐ20	Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle.	B [1] fait à la machine Pour 1ᵐᶜ de béton, Ciment de Reuchenette et du Pasquier (fin) 425ᵏ Sable de l'Arve.. 0ᵐᶜ5 Gravier de l'Arve 0ᵐᶜ8 Résistance à 28 j. 289ᵏ à 302ᵏ	Pression maxima : Clef : 30ᵏ » 1000ᵏ/m²	1° 3 étages de 9 voûtes longitudinales en béton, de 1ᵐ40 sur murs de 0ᵐ45. Tirants entre tympans. 2° *Écussons dans les tympans*

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

SÉRIE $\hat{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4].
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en $kg/\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Culée rive gauche: *Glaise et boue glaciaire* » Pression maxima : 3k2 *Pieux verticaux et obliques* [6]	Fixe »	13 » 1m50	402mc pour les 2 arches, non compris couchis et semelles		A pleine épaisseur, entre cloisons distantes de 1m	*Voûte rive droite* Maçonnerie au-dessus des voûtes, en cours *79 jours* 9 décembre	$t_c = 26^{mm}$ t'_v am' 25^{mm}, aval 24^{mm} t''_v $21^{mm}5$ (100 j.) Pile RG | Culée RD au décintrement : | →2mm après : 5mm ↓ | →6mm	Q = 19244mc Q : S_p = 6mc9 Q : W = 0mc7
Massif central : » – 3m70 sous le lit – 7 à 8m sous l'eau Pression maxima : 2k2 *Épuisements*	Boîtes à sable Plâtre entre le piston et la boîte Coins sous les hautes eaux	200mm 6				*Voûte rive gauche* Maçonnerie au-dessus des voûtes, en cours *74 jours* 28 janvier	$t_c = 19^{mm}$ t'_v am' $30^{mm}5$, aval 32^{mm} t''_v $11^{mm}7$ (51 j.) Culée RG | Pile RD au décintrement : ←5mm | 2mm ↓ après : ←1mm5 | 0	
Culée rive droite : » » Pression maxima : 3k9 »								

Pieux	*verticaux*	*inclinés à 30°*
Diamètre	*28c à 43c*	*32c à 44c*
Nombre	*177*	*227*
Fiche moyenne	*9m70*	*10m91*
Poids du mouton	*800k*	*2000k*
Hauteur de chute	»	*2 à 4m*

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

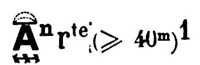
VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS A GENOU
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE A^{n} r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)

MONOGRAPHIES

PONT DE LA COULOUVRENIÈRE, SUR LE RHÔNE, A GENÈVE[1]

1895–1896 

Φ_1 (S_3)



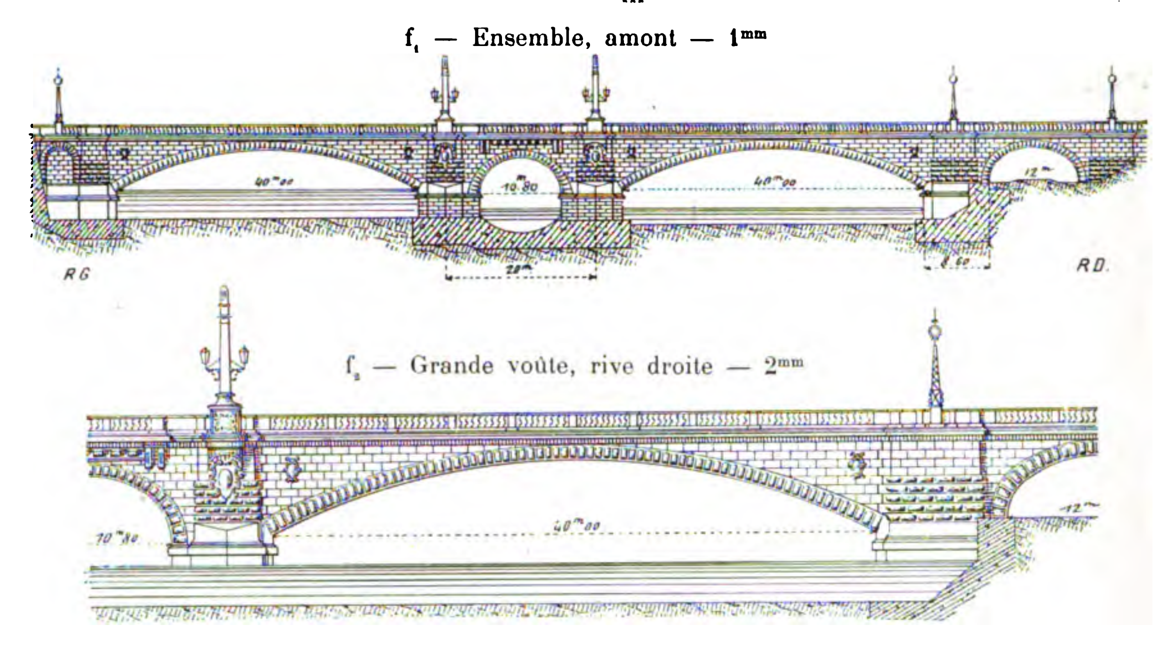
1. Articulations (f_4, f_6). — Les deux grands arcs en béton ont été, pendant la construction, articulés à la clef et aux retombées par des rotules[2] d'acier prises dans des caissons en tôle ; après décintrement, on a fermé au mortier les joints d'articulation : celui de la clef, avant les épreuves ; les autres, après.

La voûte du milieu ($10^{m}80$) et celle de rive droite (12^{m}) ont été simplement articulées par des bandes de plomb (S_3).

1. — Entre les Boulevards de Plainpalais (rive gauche) et de James Fazy (rive droite).

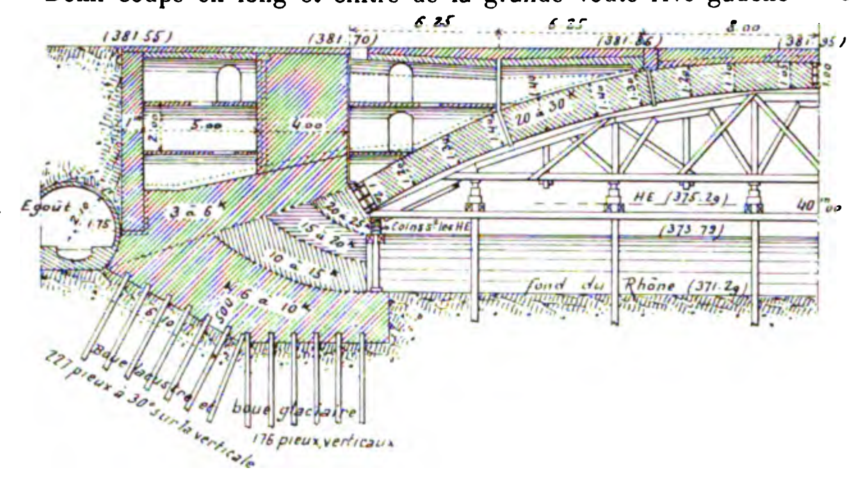
2. — « *copiées* » sur celles du pont de Munderkingen (1893). A^{1} r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)1 — Tome IV (S_1).

f₁ — Ensemble, amont — 1^mm



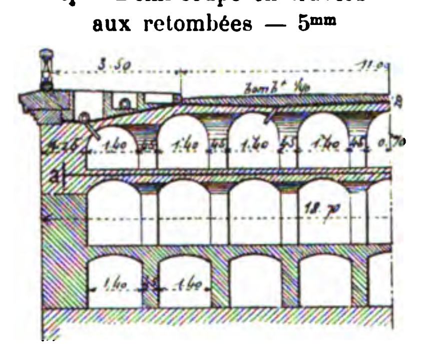
f₂ — Grande voûte, rive droite — 2^mm

f₃ — Demi-coupe en long et cintre de la grande voûte rive gauche — 3^mm

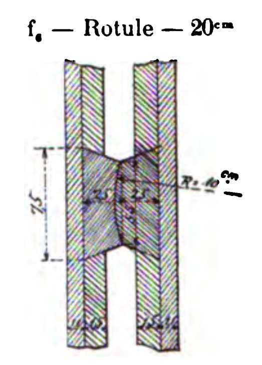


f₅ - Rotule et caisson - 5^cm

f₄ — Demi-coupe en travers aux retombées — 5^mm



f₆ — Rotule — 20^cm



2. Voûtes d'évidement (f_2, f_4). — La poussée des voûtes d'évidement sur les tympans est arrêtée par des tirants en fer *a* (f_4) de 17^m50 de longueur et 35^{mm} de hauteur, disposés tous les mètres et articulés en 3 points (S_2).

3. Matériaux.

A. - Béton. — *A_1. - Grandes voûtes.* — Voici les résultats des essais à 28 jours du béton des grandes voûtes (425^k de ciment par m c. en œuvre).

		Arche rive gauche	Arche rive droite
Résistance	minima	230^k	250^k
	maxima	380	420
	moyenne	289	302

A 28 jours, la résistance est plus grande dans le sens du pilonnage que dans l'autre.

A 84 jours, elle est la même.

A_2. - Culées. — Là où la pression dépasse 6^k, le béton est à ciment (200^k à 300^k par mc.) ; ailleurs, à chaux hydraulique de Lafarge ou de Noiraigue (200^k).

B. - Parements des têtes. — Les bossages des bandeaux sont faits d'éclats de pierre noyés dans le béton (S_2).

Les piles sont parementées en pierre jaune de Saint-Ismier (S_2) ; les socles, jusqu'à 0^m30 sous les naissances, sont en granit (blocs erratiques de la région du Salève) ; les tympans, en pierre blanche de Divonne (S_2).

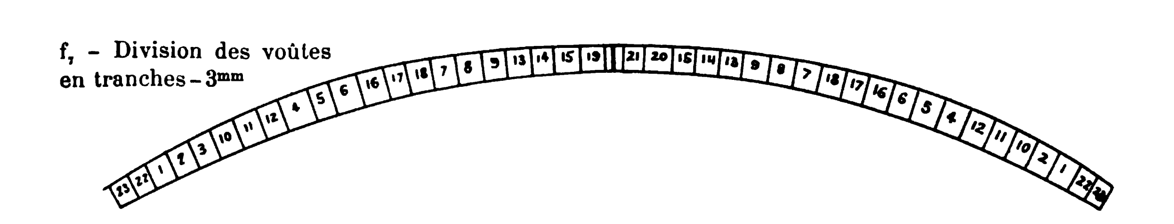
La corniche est en marbre bleu-noir de Saint-Triphon ; les balustres et les colonnes, en granit rose de Baveno.

On a mis les moins bons matériaux là où il y a le plus de travail.

4. Fondation de la culée rive gauche. — On y a rencontré de la glaise, puis de la boue lacustre, puis de la boue glaciaire.

On dressa le terrain, horizontalement à l'amont, à 30° environ à l'arrière, et on y battit des pieux.

5. Voûtes. — On les bétonna par tranches de 1^m d'épaisseur environ entre deux cloisons transversales, dans l'ordre des chiffres de f_7.


f_7 - Division des voûtes en tranches - 3^{mm}

6. Décintrement.

A. - Grande arche rive droite [3]. — On abaissa d'abord les 6 fermes de rang pair ; puis les impaires dans cet ordre : 1, 5, 9, 13, 3, 7, 11.

Voici les observations faites au décintrement, et après :

Dates		*Abaissement des pistons en* mm	Mouvements en *mm*: Pile culée rive gauche	Arche rive droite: Naissance rive gauche		Clef		Naissance rive droite		Pile-culée rive droite		Observations
			↓	amont ↓	aval ↓	amont ↓	aval ↓	amont ↓	aval ↓	↓	→	
Décintrement (Décembre 1895)	9 — 5h15 s	*10*	0	10	9	12	10	12	9	0	0	
	10 — 10h30 m	*20*		16	14	20	20	18	14	0	0	
	1h s	*30*		16.6	16	22	23	20	15.6			
		40		18	17	23	23	20	16			On déboulonne les abouts du cintre.
	11 matin			20	18	25	26	21	18			Pas de fissures. Joints de dilatation ouverts. On reprend à 1h du soir les descentes des pistons par 20mm jusqu'à 100mm.
	11 après-midi	*100*		20	18	25	24	22	17	0	→ 2	
Après décintrement (1896)	Janvier 30		2			40				0	→ 6	
	Février 14		5			43				1	→ 6	
	Février 29					43.5						

B. - Grande arche rive gauche. — Voici les observations faites au décintrement, et après :

Dates		*Abaissement des pistons en* mm	Mouvements en *mm*: Culée rive gauche			Arche rive gauche: à 10m de la clef, côté rive gauche		Clef		à 10m de la clef, côté rive droite		Pile culée rive droite	Observations
			←	amont ↓	aval ↓	amont ↓	aval ↓	amont ↓	aval ↓	amont ↓	aval ↓	aval ↓	
Décintrement (Janvier 1896)	28 soir	*10*				8	6	17	13	9	6		
	28 soir	*20*				12	11	19	18	12	9		
	29 7h30 m	*30*				14	13	24	21.6	12.6	11.8		
	29	*50*											Plus de tassement. On démonte les abouts du cintre.
	29 4h s		←5	2	3	16	16	28	27	16.6	19.6		
	30 — 8h m		←5	3	4	16	17	30.5	32	14	18	2	
Après décintrement (1896)	Février 14		←6.5	3				37					
	Février 29							41.5					
	Mars 14							42.5					
	Mars 21							43					

3. — La voûte de 12m (rive droite) avait été décintrée le 17 septembre 1895 ; celle de 10m80 du milieu, le 30 septembre.

7. Épreuves (1896).

A - 23-24 mars. — On chargea la voûte rive gauche, à partir de sa retombée rive droite, de $0^{m}50$ de gravier sur les trottoirs [4], et de $0^{m}28$ sur la chaussée (500^{k} par m. q.).

B. - 11 avril. — Deux locomotives à voie normale, pesant 75 et 76 tonnes, couvrant ensemble 42^{m}, ont passé au pas, avec un arrêt de 3 minutes.

On n'a pas constaté de mouvement sous les surcharges.

8. Dates.

			1895
Commencement des travaux			mars
Fondations	Battage des pieux	verticaux	2 août - 1er septembre
		obliques	16 octobre - 14 décembre
	Commencement du bétonnage	Culée rive droite	1er avril
		Massif central	26 avril
		Culée rive gauche	10 septembre

	Voûtes		
	Rive gauche	Centrale	Rive droite
	1895	1895	1895
Commencement du montage des cintres	4 novembre	22 juin	17 juillet
Bétonnage des voûtes	4-16 nov.	9-16 août	2-21septembre
Commencement des travaux au-dessus des voûtes	18 novembre	22 août	22 septembre
	1896		
Décintrement	28 janvier		9 décembre
Épreuves	23-24 mars 11 avril		

On a condamné les articulations : aux clefs, le 18 mars 1896 ; aux naissances, peu après le 24 mars ; inauguré et ouvert à la circulation, le 27 avril 1896.

9. Quantités.

Pierre de taille	1.568^{mc}
Béton	16.058^{mc}
Pierres de l'ancien pont, retaillées	1.618^{mc}
Total	19.244^{mc}

On a employé 3400 tonnes de ciment et 1570 tonnes de chaux.

4. — Pour tenir compte des parties inachevées. La surcharge sur les trottoirs était ainsi de près de 1000^{k} par mq.

10. Personnel. — *Projet* [5] *et Direction des Travaux (en régie) :* M. Constant Butticaz, Ingénieur, Directeur des Services industriels de la Ville de Genève.

Calculs : M. Bois, Ingénieur du Service des Eaux.

Conduite des Travaux : M. de Haller, Ingénieur.

Décoration : M. Bouvier, Architecte de l'Exposition de Genève.

5. — Le projet a été examiné par M. Karl von Leibbrand, de Stuttgart, auteur du pont de Munderkingen Ā1 rte (⩾ 40m)1, puis choisi entre plusieurs par MM. Ritter, professeur au Polytecnikum de Zurich et Ed. Elskes, Ingénieur à Lausanne.

SOURCES :

S_1. — Pièces qu'a bien voulu me communiquer M. Butticaz (juin 1910) :

S'_1. — Mémoire sur le projet et l'exécution ;

S''_1. — Dessins.

S_2. — Génie Civil, 27 juin 1896, p. 129 à 132, Pl. IX : « *Le pont de la Coulouvrenière.* « *Nouveau pont en béton sur le Rhône à Genève* », M. Berthier, Ingénieur.

S_3. — Ce que j'ai vu — été 1901.

Texte : Ce qui n'est pas spécifié S_2 ou S_3 est de S_1.
Dessins : f_1 est réduit de S'_1 ; les autres dessins, de S_2.

VOÛTES

ARTICULÉES

C'EST-A-DIRE ARTICULÉES DE FAÇON PERMANENTE,
SOUS LE POIDS MORT, LES SURCHARGES,
POUR LES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE,...

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS

SUR

PLOMB



Symbole :

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS SUR PLOMB [1]

ELLIPSES


[1]

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série E^{n} F^{r} (⩾ 40^{m}) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	*Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs {entre parapets / *entre tympans* *sous la plinthe*} Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	**INTRADOS** Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	**ÉPAISSEURS** CORPS ET TÊTES Clef *Retombées*	**BANDES DE PLOMB** *Épaisseur* Largeur {Clef / *Retombées*} *Pour les pressions, voir Tome IV, Livre III.*	**MATÉRIAUX** *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	**PRESSIONS** en $kg/\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Garching** *Bavière* 1907-1908 E^n F^r (⩾ 40m)1 *3 voûtes en anse de panier de 33m89 à 1/2,65, 44m35 à 1/3,32, 33m95 à 1/2,58.*	*141m95* 6mm 15m93	4m60 *3m80* Fruit : 1/50 0m80	Au-dessus de l'horizontale des naissances: Anse de panier à 9 centres 44m,35 *13m34* $\frac{1}{3.32}$ = 0,30 *Rayons* *à partir de la clef :* *33m70* *26m35* *18m70* *Au-dessous du plomb des reins :* [6] *15m50* *6m80* [6] Au-dessus du plomb des reins Arc d'anse de panier à 5 centres 38m,55 *7m23* $\frac{1}{5,33}$ = 0,187	1m,10 *Pas de renflement au joint de rupture* 1m75	*8mm* 38cm *83cm*	B [1] « Brückencement » « Stuttgarter Cementfabrik » de Blaubeuren.... 1v Sable .... 2v5 Gravier .... 2v5 Pierre cassée .. 2v5 Sommiers des articulations : B [1] 1v - 2v - 2v résistant à 400k/0m01²	Pression maxima : 26k » 8160k/1mc	1° Évidement ovale au-dessus des piles 2° *Tympans striés de joints creux horizontaux.*

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

6. — La courbe est prolongée au-dessous des naissances jusqu'au socle.

A VOIE NORMALE SÉRIE $E^n_{\mapsto}$ Fr (⩾40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D**
	GRANDES VOÛTES							
	CINTRES							
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Gros gravier indéfini Piles RG - 6m30 RD - 6m17 Pression : sur la base des piles.. 13k sur le sol de fondation 4k3 *Caisson en béton armé descendu par havage* Culées RG - 3m28 RD - 2m78 Pression sur le sol de fondation : 3k16 *Pilotis Têtes noyées dans du béton*	Fixe Montants et contrefiches » Vérins à vis	4 *18c* 1m235 *80mm*	12217f Pour chaque arche de rive : 6664f	48f2	A pleine épaisseur par tranches de 2 à 3m de largeur	Tympans et couronnement achevés *51 jours* 27 juin	t_c = 39mm t'_v = 15mm Arches de rive t_c / t'_v RG 30mm / 6mm RD 20mm / 23mm	Q = 3600mc Q : S_p = 5mc51 Q : W = 0mc36 D = 310 968f D : S_p = 476f2 D : W = 31f0 D : Q = 86f4

. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la cirlacution
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\underset{\mapsto}{E}^n\ F^r(\geqslant 40^m)$

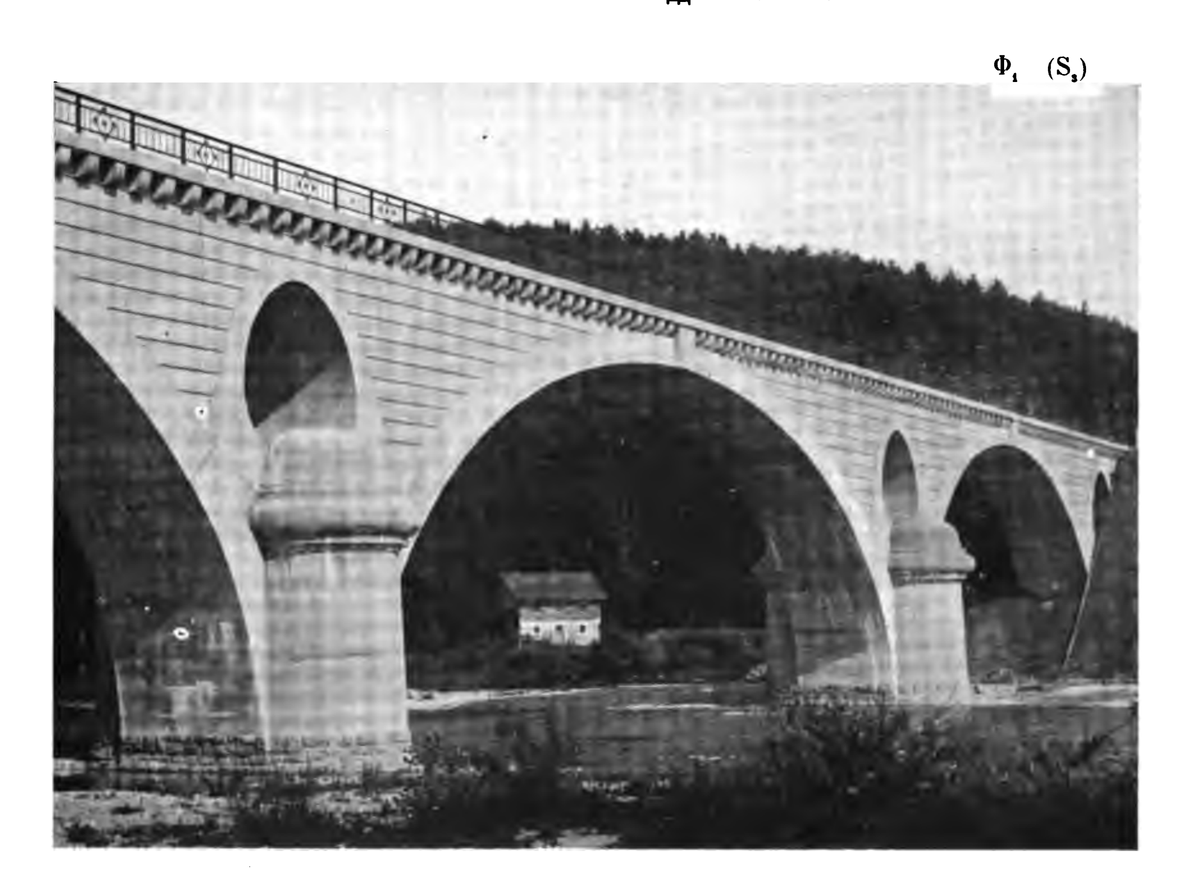
MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ALZ, A GARCHING[1] *(BAVIÈRE)*

Ligne de Mühldorf à Freilassing

1907-1908 $\underset{\mapsto}{E}^n\ F^r(\geqslant 40^m)1$

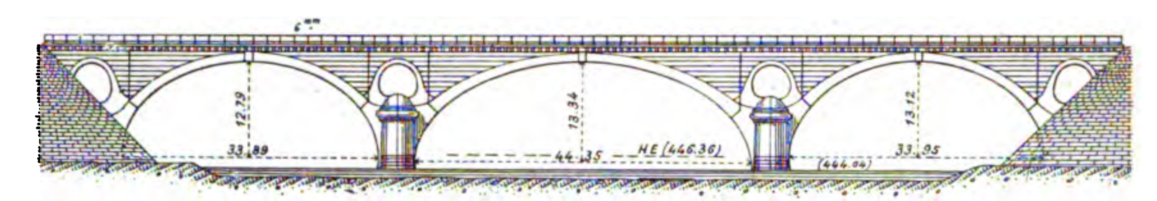
Φ_1 (S_1)



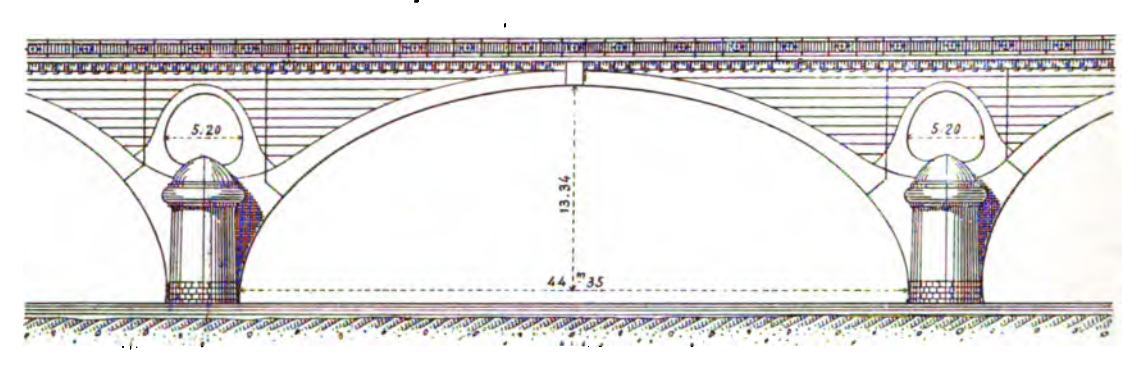
1. Quelques observations. — Sauf les parements des piles au-dessous des hautes eaux, qui sont en brèche grossièrement appareillée, tout est en béton (S_1).

1. — Près de la station de Garching, vers Freilassing.

f_1 — Ensemble — 1mm

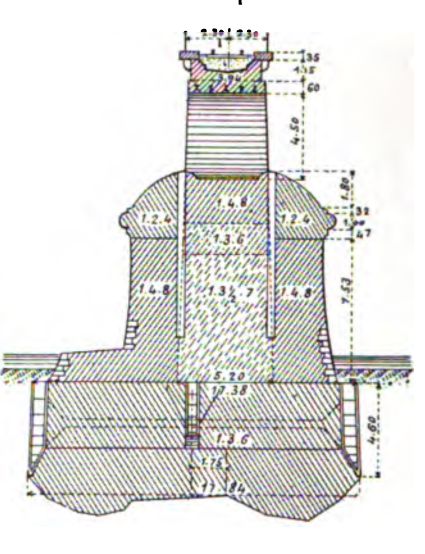


f_2 — Arche centrale — 2mm

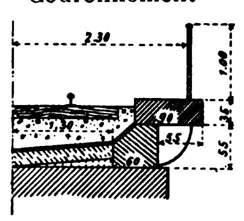


f_3 — Coupe en long — 2mm5

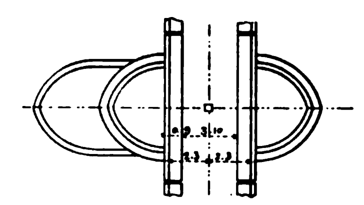
f_4 — Coupe en travers sur l'axe d'une pile — 2mm5



f_6 — Couronnement — 1cm



f_5 — Plan au-dessus d'une pile — 2mm5



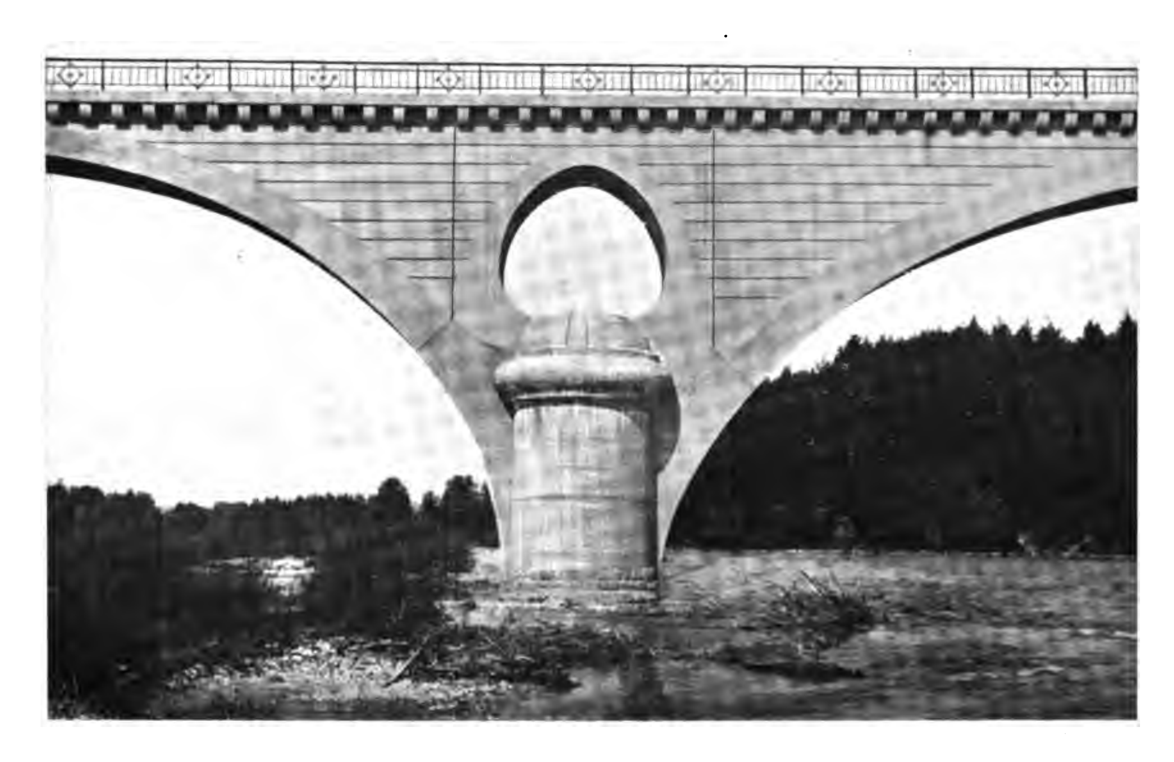
Les fondations sont pour deux voies ; l'élévation, pour la voie aval seule (f_4).

L'énorme tore et le gros chaperon qui couronnent les piles sont bien lourds [2], surtout sous un évidement.

Ceux d'amont ne sont que posés : si l'on construit le pont amont, on les déplacera (S_1).

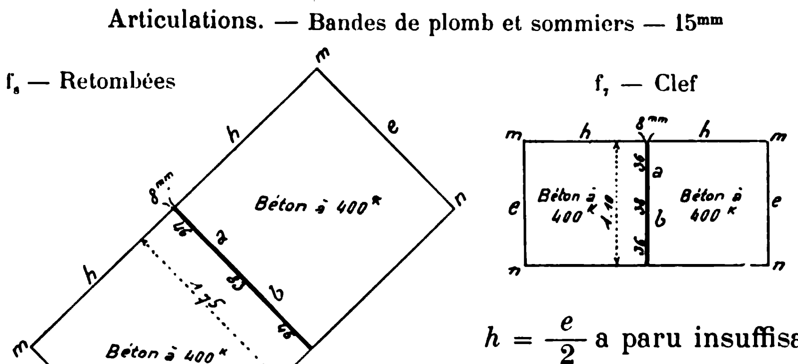
Les quarts de cône coupent de façon fâcheuse les derniers évidements (S_2).

Φ_2 (S_3)



2. Articulations sur plomb [3] (S_1). — Ce sont les plus grandes voûtes articulées sur bandes de plomb.

Articulations. — Bandes de plomb et sommiers — 15mm



Les sommiers ne sont pressés par le plomb que sur *ab*. Sur l'autre face *mn*, à cause du porte-à-faux sur *ab*, il y a tension.

Pour la réduire, il faut *h* assez grand. $h = \frac{e}{2}$ a paru insuffisant : on a pris $h = e$. [4]

2. — Il y en a d'assez semblables, - mais moins gros, - au pont de Rouzat sur la Sioule (1855).

3. — Voir les expériences sur le plomb, Tome IV, Livre I, p. 8.

4. — Voir les expériences de M. Krüger, Tome IV, Livre I, p. 18.

3. Effort limite admis sur les sommiers en béton (S''₁). — Le béton des sommiers résiste à 400^k.

Pour un effort réparti sur toute sa surface, on n'eût pas dépassé $\frac{400^k}{8} = 50^k$.

Mais, comme il n'est pressé que sur une partie de cette surface, on a accepté un effort limite de $\frac{400^k}{5} = 80^k$.

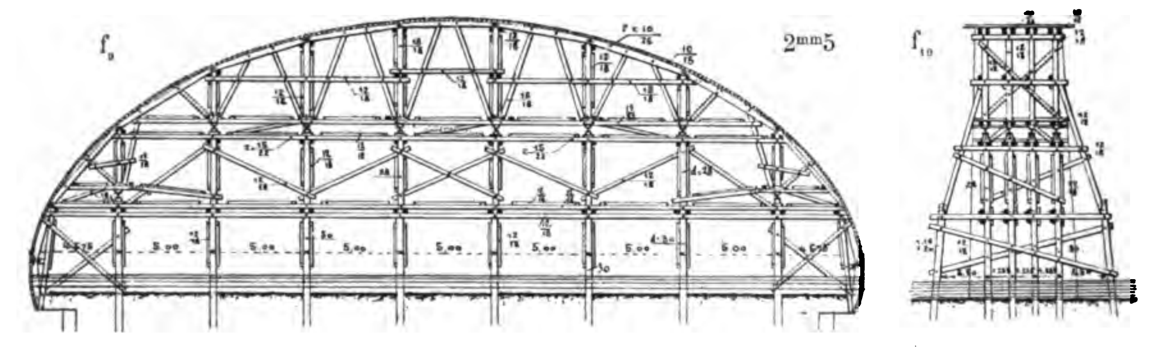
4. Résistance du béton (S_2). — La Direction des Chemins de fer imposait la résistance à 28 jours, à charge par l'Entreprise de trouver le dosage.

Voici le résultat des essais faits sur des cubes prélevés en cours d'exécution (S_2) :

Composition du béton fait à la machine, à la consistance de terre humide 1^{vol} de « Brückencement »[5] de la « Stuttgarter Cementfabrik » de Blaubeuren			Résistance exigée à 28 jours	Charge de rupture		Épreuves faites :
Sable de l'Alz lavé, trié, de 0 à 7^{mm}; on y a remis le fin, enlevé au lavage	Gravier de l'Alz de 10 à 60^{mm} trié et lavé	Pierre cassée de 10 à 50^{mm}		à	Kg	
3,5	7	»	150^k	15 j 28 j 159 j	166^k 170^k 264^k	sur les chantiers
Piles						
3	5	1	200^k	6 j 33 j 138 j	228^k 274^k 375^k	 au Laboratoire d'Essais de l'École Polytechnique de Stuttgart
Fondations						
2,5	2,5	2,5	240^k	6 j 69 j 153 j	195^k 305^k 400^k	sur les chantiers au Laboratoire d'Essais de l'École Polytechnique de Stuttgart
Corps des voûtes						
2	1	1	400^k	7 j 28 j 36 j 154 j	321^k 318^k 369^k 445^k	sur les chantiers au Musée industriel de Nuremberg au Laboratoire d'Essais de l'École Polytechnique de Stuttgart
Sommiers des articulations						

Les faces des cubes essayés à Stuttgart étaient exactement dressées.
La pression était toujours exercée dans le même sens que le pilonnage.

5. Cintre (S_1).



5. — Finesse : 16 à 18 % de résidu au tamis de 5000 mailles.

6. Fondations (S_1). — On a descendu par havage un caisson en béton armé, à l'aide d'une drague installée dessus[6].

Ses déplacements en plan n'ont pas dépassé 14^{cm}.

7. Personnel (S_1). — *Projet et Direction Générale des Travaux :* M. Beutel, Ingénieur en chef de la Construction à la Direction générale des Chemins de fer bavarois, à Munich.

Entrepreneurs : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

6. — Système proposé par M. Probst, Ingénieur en chef de l'Entreprise.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1) gracieusement communiqués par M. l'Ingénieur en chef Beutel.

S_2. — « *Mitteilung über die Druckfestigkeit von Betonkörpern, hergestellt während dem* « *Bau der gewölbten Bogenbrücken der Hauptbahn Mühldorf-Freilassing.... aus Brückencement* « *der Stuttgarter Cementfabrik Blaubeuren.* »

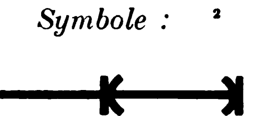
Essais certifiés par M. l'Ingénieur en chef Beutel, le 11 décembre 1908.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1909.

ARTICULATIONS ROULANTES[1]



Symbole : [2]



Voir Tome IV, Livre I :
1. — p. 10, pour la définition de l'articulation roulante,
2. — p. 28, pour le sens du symbole.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ELLIPSES [1]

E [1]

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série $E^n F^r$ ($\geqslant 40^m$) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	*Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs (entre parapets, *entre tympans sous la plinthe*) Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids; pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Chemnitz** *Saxe* 1898-1900 En Fr (⩾ 40m)[1] *11 voûtes en anse de panier: 4 de 27m90; 6 de 26m65; 1 de 43m10; toutes articulées.*	*370m5* 10mm 17m	» *4m00 entre bandeaux* » »	Anse de panier à 9 centres Entre appuis : 43m,10 » »	1m,10 *1m50* 1m25	Granit	Béton Ciment........ 1' Sable.......... 4' Pierre cassée.. 4'5		1° Pas d'évidements. 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

A VOIE NORMALE **SÉRIE $\underset{\leftrightarrow}{E}^n$ F^r (⩾ 40^m)** **TABLEAU SYNOPTIQUE**

EXÉCUTION									CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D
FONDATIONS	GRANDES VOÛTES								
	CINTRES						DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses		MODE DE CONSTRUCTION				
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg $\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Ecartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]			État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clarage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4] }
10	11	12	13	14	15		16	17	18
Gravier	Fixe Contrefiches isolées Vérins	5 *20^cm* 0^m 95 *Clef : 80^mm* *Retombées : au moins 20^mm*							

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES
ELLIPSES

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE E^{n} F^{r} (⩾ 40m)

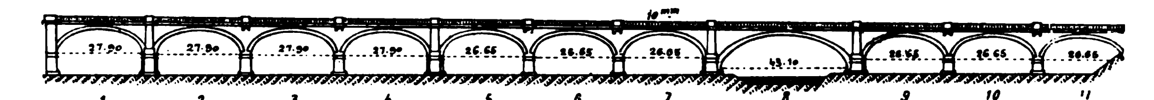
MONOGRAPHIES

PONT SUR LA CHEMNITZ, A CHEMNITZ *(SAXE)*

Ligne de Kieritzsch à Chemnitz[1]

1898–1900 E^{n} F^{r} (⩾ 40m)1

f_1 — Ensemble — 0mm4



Φ_1[2] (S_2)



1. — Pour une voie de marchandises.

2. — Voûte n° 3 de f_1.

1. Matériaux. — Tout est en béton, sauf :

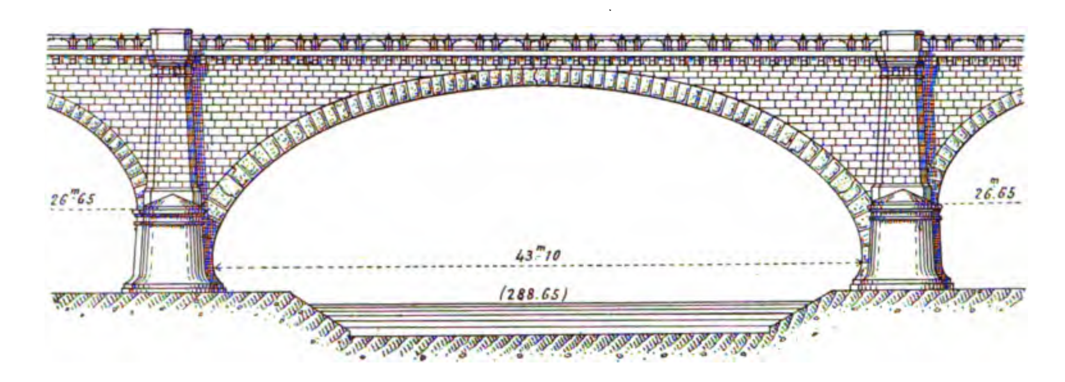
les rotules, qui sont en granit ;

le couronnement, les chaperons, les cordons au-dessus des piles, qui sont en grès.

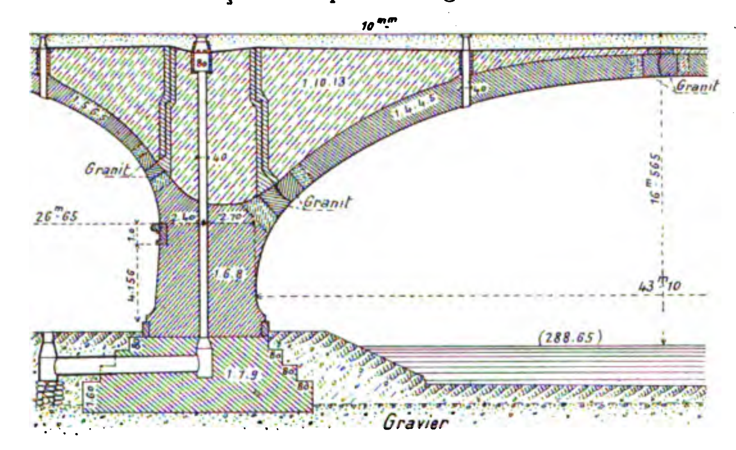
Les têtes sont en mortier de ciment coloré, jouant la pierre de taille.

Grande voûte

f_2 — Élévation — 2mm



f_3 — Coupe en long — 2mm5



2. Articulations et joints de dilatation. — Les 11 voûtes sont articulées sur rotules de granit.

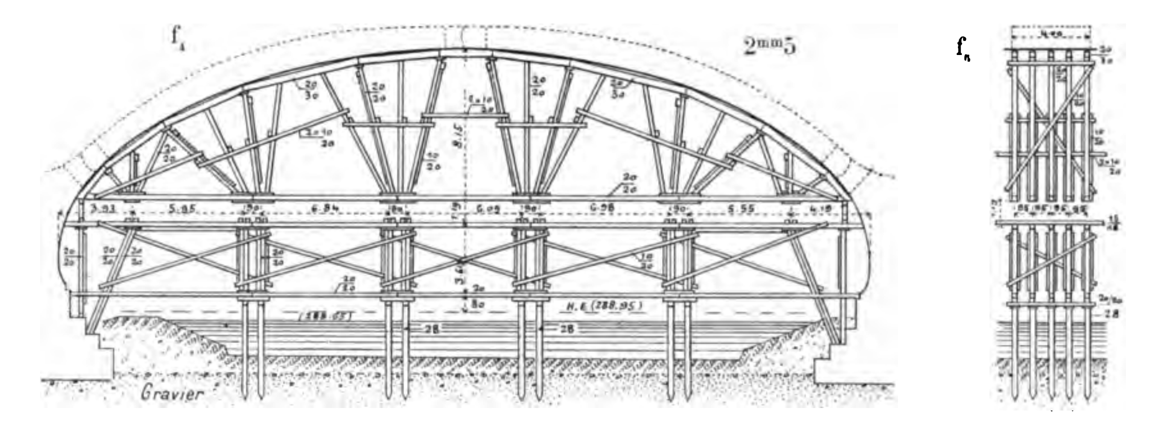
Au-dessus des rotules des reins, un joint vide coupe les tympans : on le voit un peu trop.

3. Béton.

Composition. Efforts.

	Composition Pour 1v de ciment		Pression en Kg/$\overline{0^m01}^2$		
			permise	fissurant des cubes de 40cm âgés de :	
	Sable	Pierre cassée		13 semaines	1 an
Fondations	7v	9v	»	169k	180k
Piles et parements	6v	8v	13k5	183k	232k
Tympans	10v	13v	»	118k	137k
Voûtes de 26m65 et 27m90	5v	6v5	25k	208k	260k
Voûtes de 43m10	4v	4v5	28k5 pas de tension	253k	Pas de fissure pour 311k

4. Cintre.



5. Epreuve de la grande voûte (29 juin 1901).

		Tassement de la clef	Déplacements transversaux
Sous 5 locomotives de 42^T	immobiles	$0^{mm}8$	»
	passant lentement	$0^{mm}2$ à $0^{mm}6$	»
	passant vite	»	$0^{mm}5$ $0^{mm}25$ à chaque tête
Sous 1 locomotive de 42^T passant vite		»	$0^{mm}3$

6. Personnel.

Direction : Chemins de fer de l'Etat saxon.

Projet et Entreprise : MM. Dyckerhoff et Widmann, de Dresde.

SOURCES :

S_1. — Documents qu'a bien voulu me communiquer M. le Professeur Otto Colberg, de Hambourg — février 1912 :

S'_1. — Dessins.

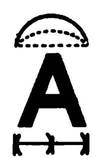
S''_1. — Notice publiée par la maison Dyckerhoff et Widmann, pour l'Exposition de Dusseldorf en 1902, — p. 31 à 34.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1908.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ARCS PEU SURBAISSÉS [1]

 [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série A [1] F^{r} (> 40^{m})

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole 1	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage 2	PROJET — ENSEMBLE: Largeurs {entre parapets / *entre tympans sous la plinthe*} Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados 3	GRANDE VOÛTE — INTRADOS: {Portée / *Montée* / Surbaissement} *Rayons* 4	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES {Clef / *Joints de rupture* / Retombées} 5	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg/0m01² Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Kempten** *Bavière* 1906 *1° Ponts aval* *2 Ponts jumeaux, écartés de 10cm, sur fondation commune* $\hat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) 1 et 2	*Ponts aval* *153m41* 10mm RD / RG 33m25 étiage	{16m75 / *16m00*} *4 voies* Fruit : 1/45 0m80	Au-dessus des naissances : Arc d'anse de panier à 11 centres {63m,80 / *25m,758* / $\frac{1}{2,477}$ = 0,403} *Rayons : à partir de la clef :* *37m706* *89m25* *38m403* *26m187* *au-dessous des rotules :* *20m39* *34m22* Au-dessus des rotules : {50m,60 / *8m85* / $\frac{1}{5,517}$ = 0,174}	1m,35 *2m00* Aux articulations de retombées, Corps : 1m85 Têtes : 2m60	Rotules d'acier moulé, appuyées sur des sommiers de béton moulé	Entre rotules B [1] damé Ciment......... 1v Sable.......... 2v5 Pierre cassée... 5v Résistance en cubes de 30c, à 28 j. : 291k Sommiers des rotules B [1] moulé Ciment.......... 1v Sable........... 2v Gravier basaltique..... 2v Résistance à 90 j. : 478k Pieds-droits, sous les rotules 1v Ciment et : Sable / Pierre cassée Sommet: 3 / 6 Base: 4 / 8 Fondations: 5 / 9	Pression maxima : 35k Pression maxima : 66k Pression maxima : 26k 19k 8k2	1° Pas d'évidements au-dessus de l'arc articulé. Remplissage en béton maigre à 1 : 12 2° »
2° Pont amont $\hat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) 3	*Pont amont* » 10mm RG / RD 31m39 étiage	{8m25 / *7m50*} Fruit : 1/45 »	Au-dessus des naissances : {64m,50 / *27m576* / $\frac{1}{2,339}$ = 0,428} *Rayons : au-dessous des rotules :* *20m39* *36m42* Le reste comme aux Ponts aval			Ciment Dyckerhoff et fils, de Karlsruhe	Surcharge par mct de voie : Locomotives : 8160k Wagons : 3810k	

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

A VOIE NORMALE **SÉRIE $\hat{A}^1$ Fr ($\geqslant 40^m$)**

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D**
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/$\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher	Retroussé sur 36^m80	6	Pour un seul cintre :			Voûtes nues		*Pour les 3 ponts :*
		25^{cm}	275^{mc}	$0^{mc}42$			*Ponts aval :*	$Q = 23\,800^{mc}$
		1^m55	»	»	A pleine épaisseur en 16 tranches		*1er Pont :* $t'_v = 29^{mm}$ *2e Pont :* $t'_v = 3^{mm}$	*Pour les ponts jumeaux :* $\frac{2\,Q}{3} : S_p = 6^{mc}27$ $\frac{2\,Q}{3} : W = 0^{mc}25$
»	*Au-dessus des rotules :* *Bois* *Au-dessous :* *Fer*		74040^f	114^f2		*Partie entre rotules :* *42 jours* *Au-dessous :* *14 jours plus tard*	Tassements totaux à comparer avec le surhaussement	
		Surhaussement : *Bois : 50^{mm}* *Fer : $23^{mm}4$*						
Pression maxima : 8^k2								*Pour les 3 ponts :* $D = 1\,426\,500^f$
	Vérins de 30^T travaillant normalement à 22^T							*Pour les ponts jumeaux :* $\frac{2\,D}{3} : S_p = 370^f1$ $\frac{2\,D}{3} : W = 15^f0$
»								*Pour les 3 ponts :* $D : Q = 59^f9$

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES — ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS PEU SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE Â[1] Fr (⩾ 40m)

MONOGRAPHIES

---

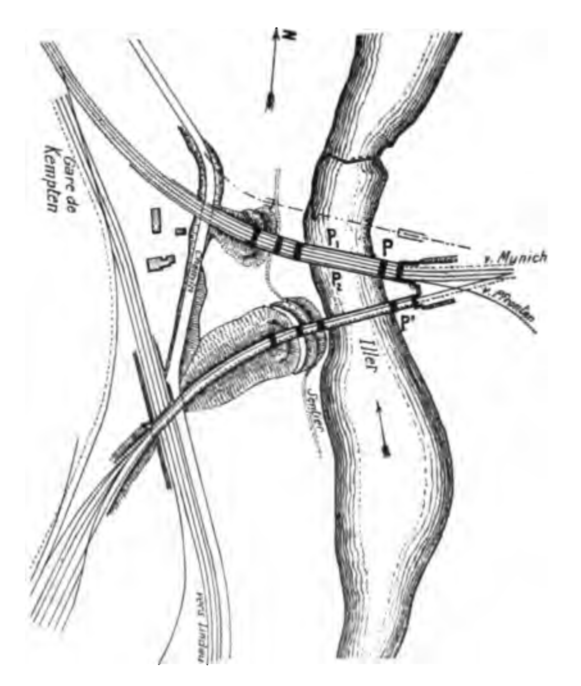
3 PONTS SUR L'ILLER, PRÈS DE LA GARE DE KEMPTEN *(BAVIÈRE)*

1906 — Â[1] Fr (⩾ 40m) 1, 2, 3

1. Emplacement des trois ponts (f_1). —

La ligne Munich-Kempten traversait l'Iller, d'abord sur une poutre Howe en bois, puis sur un pont en fer devenu à son tour insuffisant pour les nouvelles machines.

f_1 — Plan d'ensemble — 0mm15



Pour le remplacer, on a construit :

en P (f_1), deux ponts à 2 voies P_1, P_2, de même portée : 63m80; de même largeur entre têtes : 7m95; à 10cm l'un de l'autre, sur fondation commune (S_2) ;

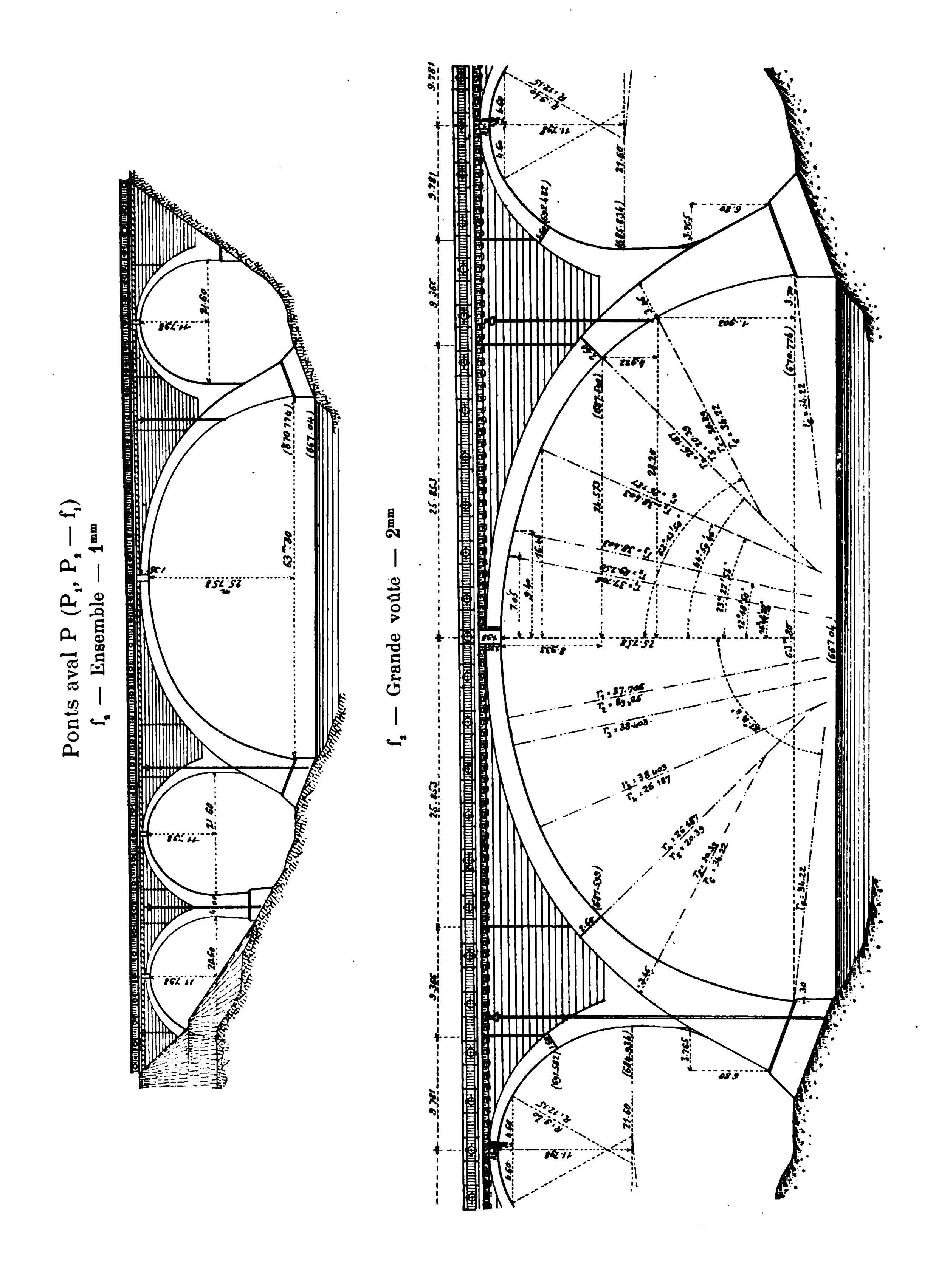
en P', un troisième pont à deux voies, à 1m82 (S_2) plus haut que les ponts P, de 64m50 de portée, de 7m50 de largeur entre têtes.

2. Dispositions communes.

Les 3 ponts sont en béton.

Les voûtes, grandes et petites, sont articulées à la clef et aux reins ; toutes sont en arc sur culées en surplomb.

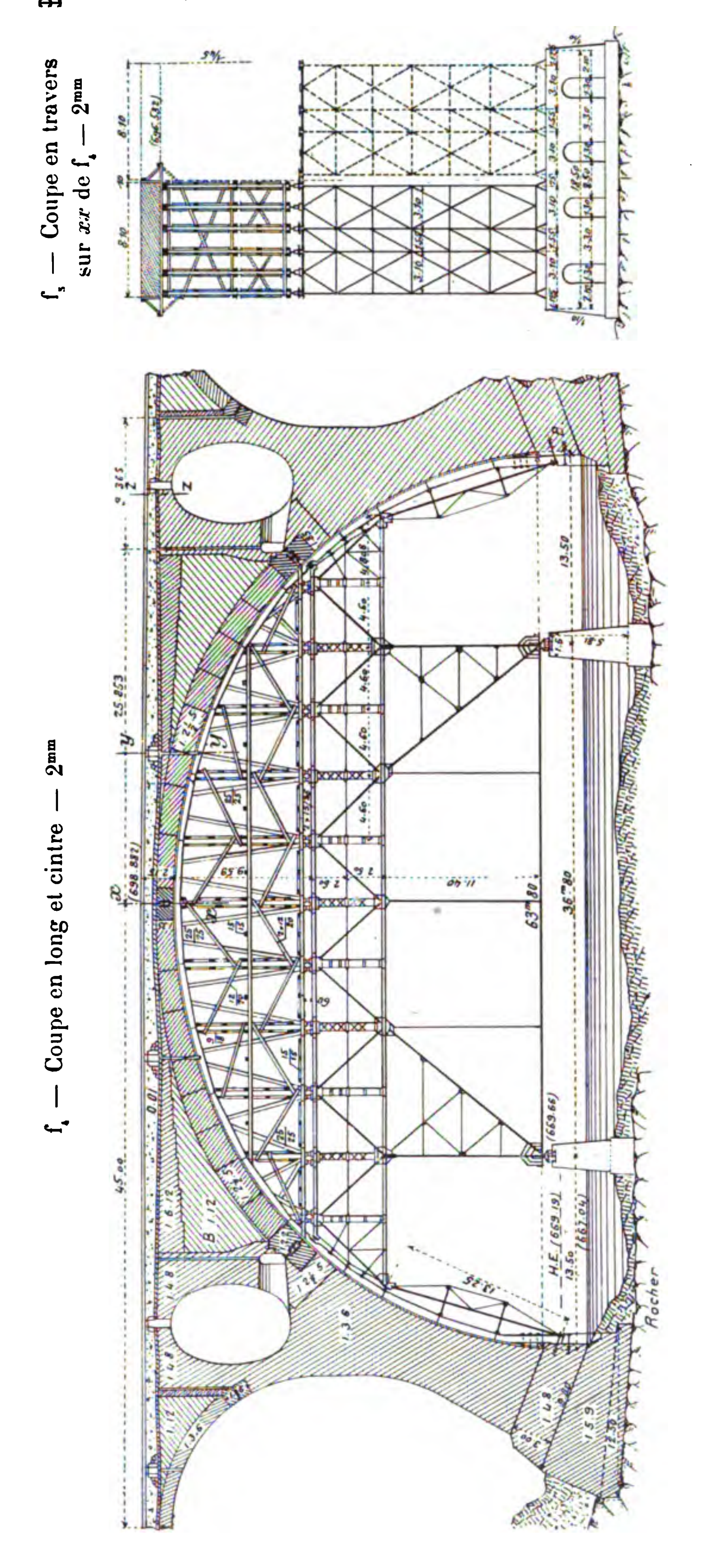
Il est très évident qu'on ne s'est pas préoccupé de l'aspect (S_2).



Ponts aval P (P_1, P_2 — f_1)

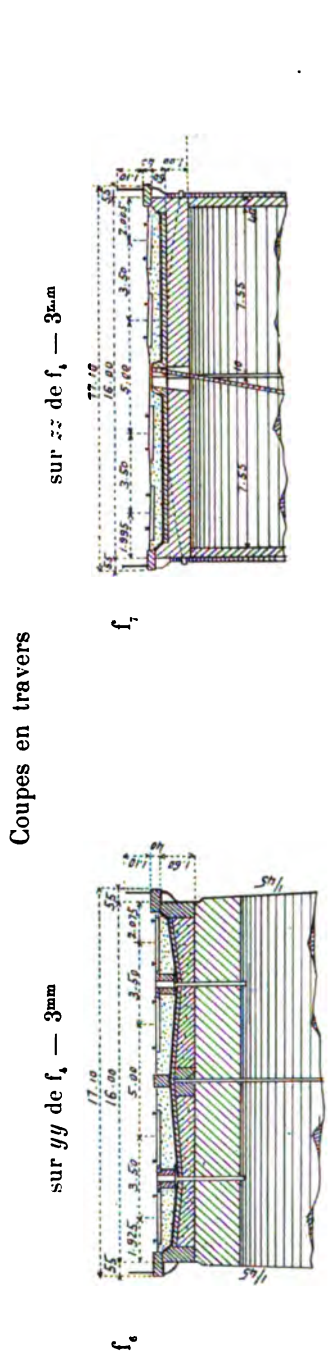
f_2 — Ensemble — 1mm

f_3 — Grande voûte — 2mm



f_3 — Coupe en travers sur xx de f_4 — 2^{mm}

f_4 — Coupe en long et cintre — 2^{mm}



Coupes en travers

f_7 sur zz de f_4 — 3^{mm}

f_6 sur yy de f_4 — 3^{mm}

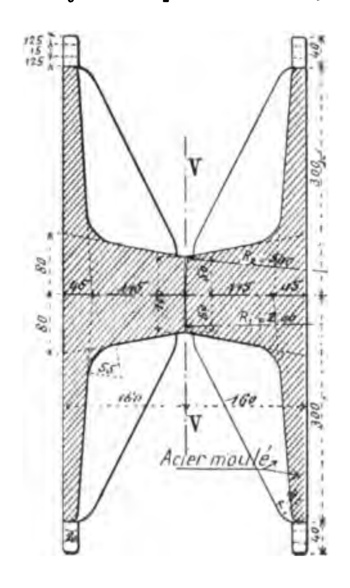
Φ_1 (S_3) — A gauche, les deux ponts aval P_1, P_2 ; à droite, le pont amont P' (f_1)



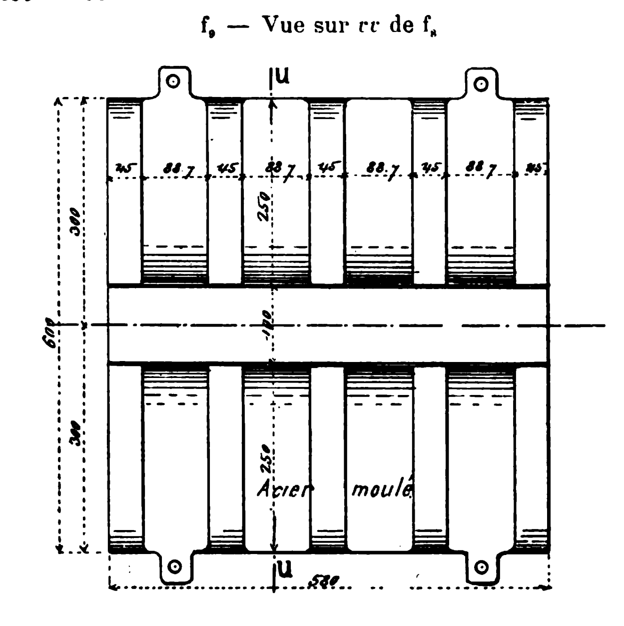
3. Articulations des grandes voûtes (f_8 à f_{11}).

Rotules — 10cm

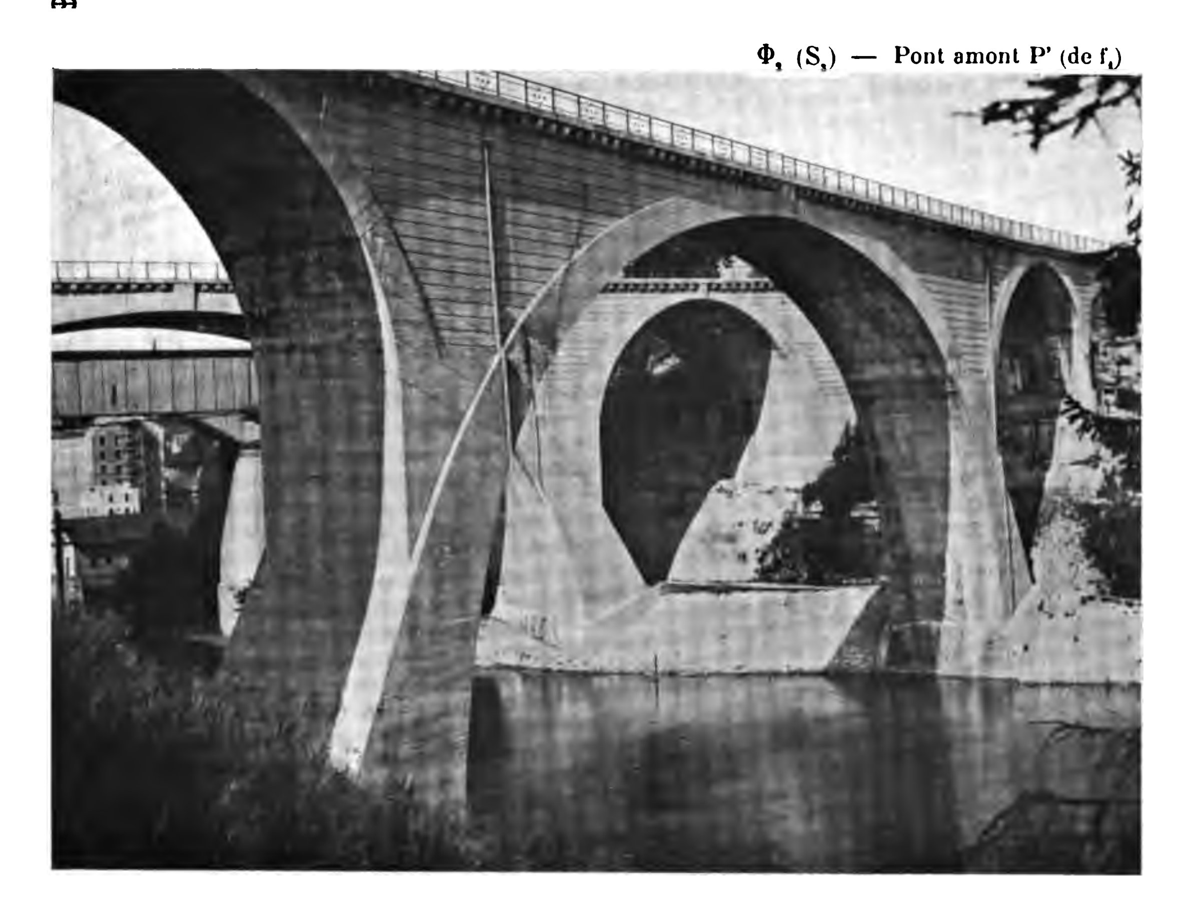
f_8 — Coupe sur *uu* de f_9



f_9 — Vue sur *vv* de f_8



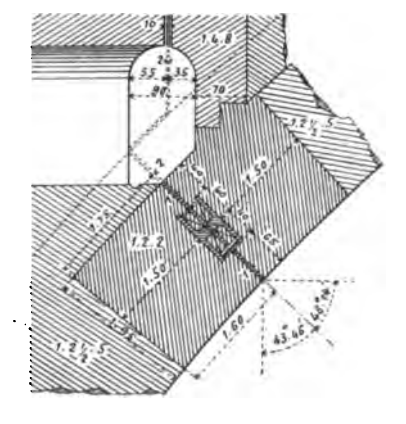
Φ_2 (S$_2$) — Pont amont P' (de f_4)



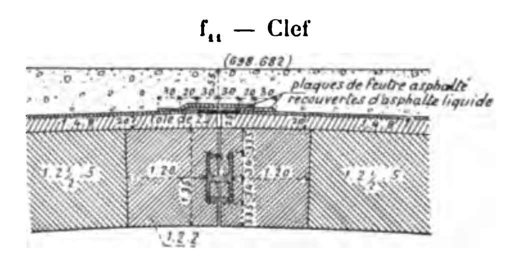
4. Joints de dilatation des tympans. — Au-dessus des rotules, les tympans et le remplissage sont coupés par des joints de dilatation de 2^{cm}, fermés par une tôle galvanisée de 2^{mm} d'épaisseur, 60^{cm} de largeur, recouverte de deux feuilles de feutre asphalté (f_{11}).

Rotules et sommiers — 1^{cm} (S$_2$)

f_{10} — Retombées



f_{11} — Clef



5. Sommiers en béton des rotules. — On avait imposé à l'Entreprise une résistance de 400ᵏ à 28 jours.

Voici le résultat des essais :

A. — Cubes de béton de 30ᶜᵐ :

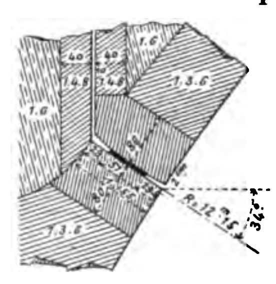
Composition — 1ᵛᵒˡ ciment Dyckerhoff et fils et : Sable (7ᵐᵐ) — Provenance	Dosage	Gravier ou Pierre cassée (1/3 de 7 à 15ᵐᵐ; 2/3 de 15 à 25ᵐᵐ) — Provenance	Dosage	Résistance à l'écrasement, en Kg/0ᵐ01² — à 28 jours, avec sable : non lavé	à 28 jours, avec sable : lavé	à 90 jours, avec sable : non lavé	à 90 jours, avec sable : lavé
Heising	1	Pierre cassée basaltique d'Immendingen	1 1/4	348	372	418	468
	1 1/2		1 1/2	346	367	432	447
	2		2	*343*	*350*	*413*	*478*
	1	Dolomite de Pfronten	1 1/4		329		390
	1 1/2		1 1/2		314		381
	2		2		283		351
	1	Gravier de Heising	1 1/4	344	324	406	401
	1 1/2		1 1/2	313	317	374	393
	2		2	304	311	344	389
basaltique d'Immendingen	1	Pierre cassée Basalte	1 1/4	339	343	444	489
	1 1/2		1 1/2	282	339	401	494
	2		2	241	331	352	469

B. — Cubes de mortier de 10ᶜᵐ :

1 vol. ciment Dyckerhoff et fils et :	Dosage	28 j. non lavé	28 j. lavé	90 j. non lavé	90 j. lavé
Sable de Heising	2 1/2	457	462	542	521
	4	371	314	397	466
Pierre écrasée de Heising	2 1/2	304		369	
	4	261		284	
Dolomite écrasée de Pfronten	2 1/2	330		408	
	4	267		331	
Sable de Heising et dolomite écrasée de Pfronten par moitié	2 1/2	368		431	
	4	273		309	

On a accepté 350ᵏ au dosage 1ᵛ, 2ᵛ, 2ᵛ *(chiffres en italiques du tableau A).*

6. Articulations sur plomb et joints de dilatation des voûtes latérales. — Ces voûtes sont articulées par des bandes de plomb[1] de 8ᵐᵐ d'épaisseur, 35ᶜᵐ (S_1) de largeur à la clef et 57ᶜᵐ aux retombées, posées entre des sommiers de béton : elles travaillent à 29ᵏ par 0ᵐ01² à la clef, à 48ᵏ aux reins.



f_{13} Retombée d'une voûte latérale 1ᶜᵐ

1. — Aux essais faits à Munich, des plaques carrées du même plomb, de 10ᶜᵐ de côté, 8ᵐᵐ d'épaisseur, ne cédaient qu'à 425ᵏ.

7. Cintre. — Le cintre, pesant 250 tonnes, a été déplacé parallèlement, du pont P_1 sous le pont P_2, puis démonté et remonté sous le pont P' (f_1).

Il était calculé pour supporter une fois 1/2 le poids des voûtes.

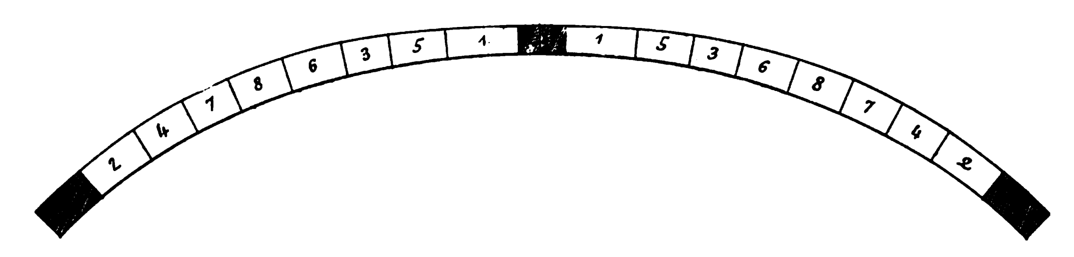
L'effort limite admis par $\overline{0^{m}01}^2$ était :

pour le fer		1200k
pour le bois	dans le sens des fibres	28k
	dans le sens perpendiculaire	12k [2]

On n'a pas chargé le cintre.

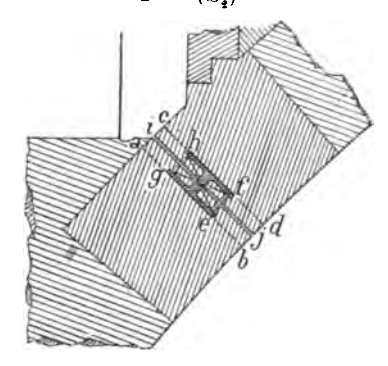
8. Exécution des grandes voûtes. — Chaque grande voûte a été construite à pleine épaisseur, en 16 tranches symétriques, chaque tranche en une seule journée, dans l'ordre des chiffres de f_{13}.

f_{13} — Ordre d'exécution des tranches — $2^{mm}5$



Pendant la construction, les deux parties d'une même rotule étaient solidarisées par des boulons de 16^{mm}.

f_{14} — Bétonnage entre les sommiers d'articulation 1^{cm} (S_2)



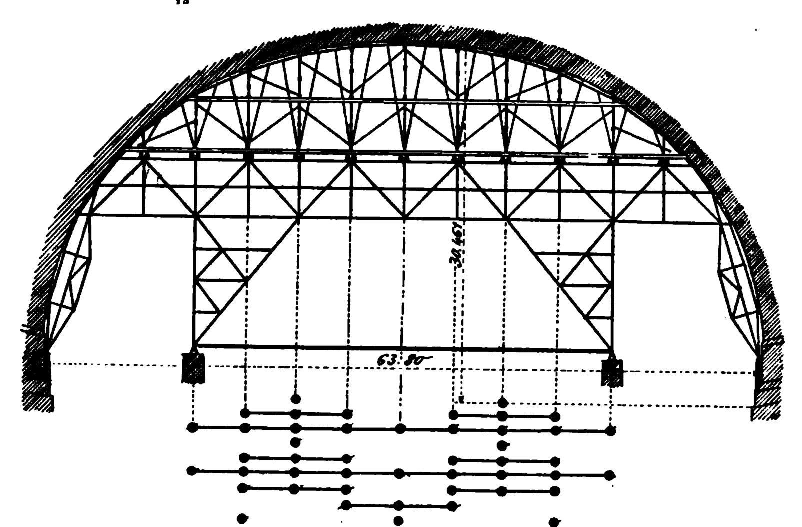
Avant de bétonner l'intervalle entre les lits *ab* et *cd* (f_{14}), on réservait, suivant le lit *ij* de contact des rotules, un intervalle libre de $1^{cm}05$, par des plaques de liège de 1^{cm} entre feuilles de zinc de $0^{mm}25$. Quand le béton arrivait aux boulons condamnant les rotules, on les sciait, puis on achevait de bétonner.

9. Décintrement. — On décintra entre rotules, avant de construire les tympans, 6 semaines après le clavage, en allant du milieu de chaque demi-voûte vers sa clef et vers sa retombée [3].

2. — Au Pont Cornélius [$\widehat{A}^n$ rte ($\geqslant$ 40m) 3], les semelles s'étaient écrasées sous 26k (S_1).

3. — C'était considérer l'arc à 3 articulations comme formé de deux voûtes à 2 articulations.

f_{13} — Marche du décintrement — 1mm5



Les points réunis par un trait horizontal sous le croquis f_{13} ont été abaissés en même temps de la même quantité.

On ne constata pas de fissures.

14 jours après, on décintra au-dessous des rotules.

Au décintrement, les voûtes travaillent à 18k7 à la compression et à 1k4 à la traction.

10. Quantités. — Voici le cube du béton employé dans les 3 ponts :

Fondations	4.500mc
Pieds-droits avec leurs appuis	11.000
Grandes voûtes	2.500
Petites voûtes	1.600
Tympans et remplissage	4.200
Total	23.800mc

11. Personnel.

Projet et Direction générale des Travaux : M. Beutel, Ingénieur en chef de la Construction à la Direction Générale des Chemins de fer bavarois, à Munich.

Direction immédiate : M. Gumprich, « Regierungs-Rat » à Kempten ;
M. Endres, « Genal Diron Rat » à Munich.

La partie métallique du cintre a été projetée et exécutée par les Etablissements de construction de ponts de Gustavsburg (Usines réunies d'Augsbourg et Nuremberg).

Entrepreneurs : Ponts P_1, P_2 (de f_1) : MM. A. Kunz et Cie, de Kempten ;
Pont P' (de f_1) : MM. Dyckerhoff et Widmann, de Karlsruhe

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution gracieusement remis par MM. Beutel et Kunz.

S_2. — Deutsche Bauzeitung, 1906, 21 avril, p. 219 à 222 ; — 28 avril, p. 232 à 236 ; — 12 mai, p. 261 à 264 : « *Die Illerbrücken bei Kempten in Allgäu* », von Regierungs-Baumeister a. D. Colberg, Direktor der Firma Dyckerhoff und Widmann, Karlsruhe.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

Ce pont a été décrit dans le Génie Civil du 16 février 1907, p. 257 à 260, Pl. XVI : « *Ponts en béton à « 3 rotules, sur l'Iller, à Lautrach et à Kempten (Bavière)* » A. C.

Texte : Ce qui n'est pas spécifié S_3 est de S_2.
Dessins : Ils sont réduits de S_1 et rectifiés d'après S_2 pour les modifications en cours d'exécution.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]

 [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série A[1] r^{te} (⩾ 40^{m}) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs (entre parapets / *entre tympans sous la plinthe*) Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados [1]	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/$0^{m}01^{2}$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Grasdorf** *Hanovre* 1899-1900 A[1] r^{te} (⩾ 40^{m})1	*64^{m}* 20^{mm} 20^{mm} Palier sur 4^{m} à la clef 6^{m}75	6^{m}00 *6^{m} 00* Pas de fruit 0^{m}40	Arc de cercle. Entre appuis : **40^{m},00** *4^{m} 50* $\frac{1}{8{,}88}$ = 0,112 Entre axes des rotules : **40^{m},386** *4^{m} 518* $\frac{1}{8{,}93}$ = 0,111 *46^{m}694*	0^{m},85 *1^{m} 16* 0^{m}90	Granit	B [1] Ciment Portland 1^{v} Sable de la Leine 2^{v}5 Basalte cassé... 4^{v} Résistance : à 42 j........ 178^{k} à 96 j........ 228^{k}	Pression maxima dans la voûte : 37^{k} Surcharges : 2 tuyaux de conduite ; 400^{k}/1^{m2} ; Voiture de 20^{T} à essieux de 1^{m}50 espacés de 4^{m}	1° 10 voûtes transversales vues, en plein cintre 8 de 1^{m}30, 2 de 1^{m}40, sur piles de 0^{m}60. 2° »
de **Göhren** *Saxe* 1903-1904 A[1] r^{te} (⩾ 40^{m})2	*76^{m}90* 35^{mm} 35^{mm}7 9^{m}50	5^{m}40 *5^{m}40* Pas de fruit 0^{m}60	Arc d'anse de panier. Entre appuis : **60^{m},00** *6^{m} 75* $\frac{1}{8{,}88}$ = 0,112 Entre axes des rotules : **60^{m},56** *6^{m} 80* $\frac{1}{8{,}89}$ = 0,112	1^{m},10 *1^{m}50* 1^{m}20	Granit	Voûte en petits moellons Aux têtes, crépi simulant de grandes PT [1] *Ciment — 0^{mc}4*	Pressions : sans surcharge : (MAX. / moy.) Clef 31^{k} / 30^{k}1 Joints de rupt. 30^{k}6 / 28^{k}5 Retombées 33^{k}5 / 28^{k}1 avec surcharge : (MAX. / moy.) Clef 35^{k}7 / 34^{k}9 Joints de rupt. 39^{k}1 / 37^{k}8 Retombées 40^{k}2 / 33^{k}1 400^{k}/1^{m2} Rouleau de 30^{T}	1° 6 voûtes transversales vues, en plein cintre de 2^{m}, 2^{m}40, 2^{m}80 sur piles de 0^{m}90 et 1^{m}00 2° »
de la **Wallstrasse** à **Ulm** *Wurtemberg* 1904-1905 A[1] r^{te} (⩾ 40^{m})3	*90^{m}50* 10^{mm} 44^{mm} Palier sur 5^{m} à la clef 15^{m}07 (sol)	10^{m}00 *8^{m}80* Fruit : 1/20 0^{m}64	Anse de panier à 7 centres. Entre appuis : **65^{m},448** *11^{m}942* $\frac{1}{5{,}48}$ = 0,182 Au-dessus des rotules : Arc d'anse de panier à 5 centres **57^{m},00** *5^{m} 80* $\frac{1}{9{,}827}$ = 0,101 *Rayons à partir de la clef : 60^{m}, 80^{m}, 20^{m} au-dessous des rotules : 5^{m}*	1^{m},06 *1^{m} 60* 1^{m}50	Acier moulé	B [1] Ciment......... 1^{v} de Blaubeuren Sable du Danube 3^{v} Pierre cassée calcaire...... 5^{v} Densité : 2400^{k} Au voisinage des articulations : Ciment......... 1^{v} Sable.......... 1^{v} Pierre cassée... 2^{v}5 (porphyre) Densité : 2300^{k}	Pression maxima : 40^{k} Sur les trottoirs : 450^{k}/1^{m2} sur la chaussée : 400^{k}/1^{m2} Rouleau à vapeur de 18^{T}	1° Plate-forme de 16^{cm} en béton armé, sur piliers carrés de 30 à 45^{c} d'arête, en béton armé 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE $\overset{\frown}{A}{}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D**
	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE							
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg $\overline{0^{m}01}^{2}$ *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Ecartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	**DÉCINTREMENT** État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	**TASSEMENTS DE LA CLEF** sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Gravier sablonneux $1^{m}30$ au-dessus de la marne Pression : 4^{k} à 5^{k} sans tenir compte de la poussée des terres	Fixe Montants et contrefiches *Sapin* Boîtes à sable (grillé) placées entre billots la veille du décintrement	5 *18^{cm}* $1^{m}45$ *90^{mm}*			A pleine épaisseur, en 16 tranches symétriques construites à partir des retombées Béton pilonné par couches horizontales de 20^{cm}	Tympans achevés *49 jours* 12 septembre	$t_c = 55^{mm}$ $t'_v = 24^{mm}$ $t''_v = 32^{mm}$ (129 j.)	Fondations : 1050^{mc} Élévation : 2000^{mc} $Q = 3050^{mc}$ $Q : S_p = 7^{mc}94$ $Q : W = 1^{mc}09$ $D = 113\,158^{f}$ (Forfait) $D : S_p = 294^{f}7$ $D : W = 40^{f}4$ $D : Q = 37^{f}1$
Rocher (Granulite) -4^{m} à $-7^{m}50$ sous le terrain Pressions MAXIMA : $8^{k}9$ moyenne : $8^{k}2$ *Batardeau à double enceinte*	Fixe Montants et contrefiches » Coins	6 *20^{cm}* Fermes interm.: $1^{m}00$ / $1^{m}03$ Fermes de rive: $1^{m}08$ *122^{mm}*	Cintre 141^{mc} Palées 30^{mc} 171^{mc}	$0^{mc}51$	A pleine épaisseur, en 6 tronçons	Voûte nue *42 jours* 1er et 2 décembre	$t_c = 66^{mm}$ $t'_v = 31^{mm}3$ $t''_v = 10^{mm}7$ (3 j.) Recul des culées (moyennes de l'amont et de l'aval) R D $0^{mm}47$ R G $0^{mm}71$	$Q = 2\,099^{mc}$ $Q : S_p = 5^{mc}05$ $Q : W = 0^{mc}57$ $D = 72\,226^{f}$ $D : S_p = 173^{f}9$ $D : W = 19^{f}5$ $D : Q = 34^{f}4$
Bon calcaire jurassique » Pression maxima : 8^{k} »	Fixe Montants et contrefiches » Boîtes à sable	8 *25^{cm}* $1^{m}40$ *90^{mm}*	400^{mc} y compris les cloisons de tête » 29000^{f} le bois restant à l'Entrepreneur	$0^{mc}58$ » $42^{f}2$	A pleine épaisseur, en 28 tranches symétriques	Ouvrage presque entièrement achevé *63 jours* »	t_c Clef 12^{mm}, Jts de rupt. 15^{mm} et 18^{mm} dû en partie à la compression du sable des boîtes $t'_v = 7^{mm}4$ Recul des culées : Nord $0^{mm}2$ Sud $0^{mm}3$	$Q = 4\,540^{mc}$ $Q : S_p = 5^{mc}01$ $Q : W = 0^{mc}44$ $D = 195\,836^{f}$ $D : S_p = 216^{f}4$ $D : W = 19^{f}0$ $D : Q = 43^{f}1$

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
PONT Date Symbole	*Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	**INTRADOS** Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	**ÉPAISSEURS** CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	**ROTULES** *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	**MATÉRIAUX** *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	**PRESSIONS** en kg/$\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées	1° **ÉVIDEMENTS DES TYMPANS** 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Élise à **Neubourg** *Bavière* 1906-1907 A[1] r^{te} (⩾ 40^m)4	*80^{m}10* 12^{mm} 12^{mm} Palier sur 8^m à la clef 8^{m}45 étiage	8^{m}90 *8^{m}70* Pas de fruit 0^{m}40	Arc avec raccord vertical aux retombées: Portée entre culées : 47^m,50 Entre axes des rotules : 43^m,50 *4^{m}40* $\frac{1}{9,886} = 0,101$	0^m,95 *1^m,20* 1^{m}15	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte appuyés sur des sommiers de granit	Bandeaux : PT[1] Muschelkalk *Ciment — 325^k* Douelle et Queutage : B[1] Ciment...... 1^v Sable....... 2^v 1/3 Pierre cassée et gravier. 4^v 2/3	Pression maxima : sans surcharge : Clef : 25^k Joints de rupture : 21^{k}5 Retombées : 22^k avec surcharge : Clef : 27^k Joints de rupture : 35^{k}7 Retombées : 24^{k}5 500^k/1$^{m^2}$ et Rouleau à vapeur de 20^T	1° 8 voûtes transversales biaises, cachées, en arc, de 2^{m}40 d'ouverture biaise, sur piles de 0^{m}40. 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

SÉRIE $\hat{A}^1$ r^te^ (≥ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION									CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE								
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF		
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses						
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Ecartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v		Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17		18
Rocher » Pression maxima : avec surcharge : 5k1 sans surcharge : 4k4 »	Fixe Montants et contrefiches » Vérins à vis	8 » 1m16 *80mm*	260mc	0mc62	A pleine épaisseur, par tranches de 1m50 à 3m50	Voûtes d'évidement construites	t_c = 40mm t'_v = 24mm		Béton : 1920mc Maçonnerie : 300mc Q = 2220mc Q : S_p = 3mc11 Q : W = 0mc39 D = 209780f D : S_p = 294f3 D : W = 36f7 D : Q = 94f5

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS TRÉS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\overset{\frown}{\underset{\leftrightarrow}{A}}{}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LA LEINE, PRÈS DE GRASDORF[1] *(ALLEMAGNE - Hanovre)*

Route reliant l'usine d'alimentation de la Ville de Hanovre

à la Route de Hanovre à Hildesheim

1899-1900 $\overset{\frown}{\underset{\leftrightarrow}{A}}{}^{1}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)1

Φ_1 (S''_1)



1. — à $8^{k}3$ du village.

1. Grande voûte. — C'est un arc en béton à 3 articulations de granit.

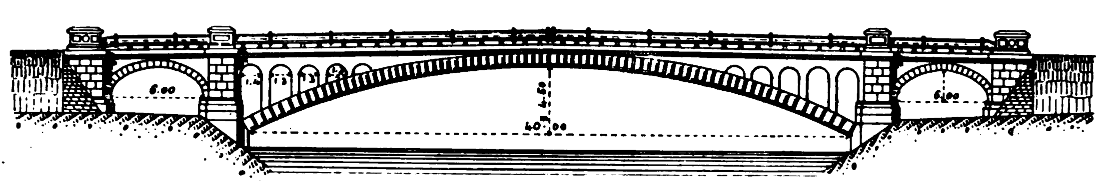
On a fait une grande arche pour ne pas relever les hautes eaux, qui atteignent déjà le village de Grasdorf.

On a adopté le béton parce qu'on avait, sur place, d'excellent sable.

L'intrados est en arc de cercle. L'extrados est renflé en arc d'anse de panier à 7 centres.

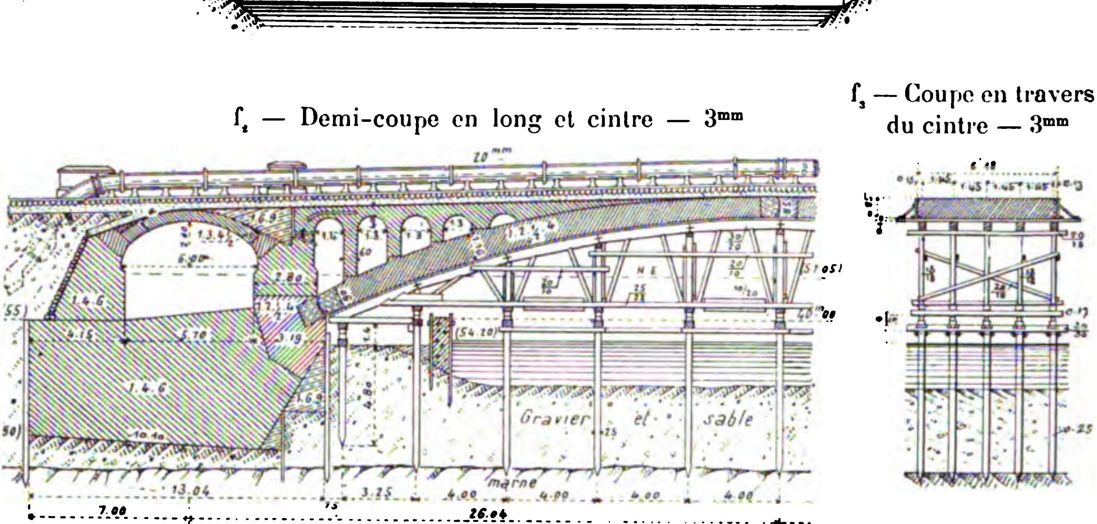
Les bandeaux de la voûte et les pilastres sont à forts bossages et joints simulés : les tympans, à surface lisse.

f_1 — Élévation — 2^{mm}



f_2 — Demi-coupe en long et cintre — 3^{mm}

f_3 — Coupe en travers du cintre — 3^{mm}



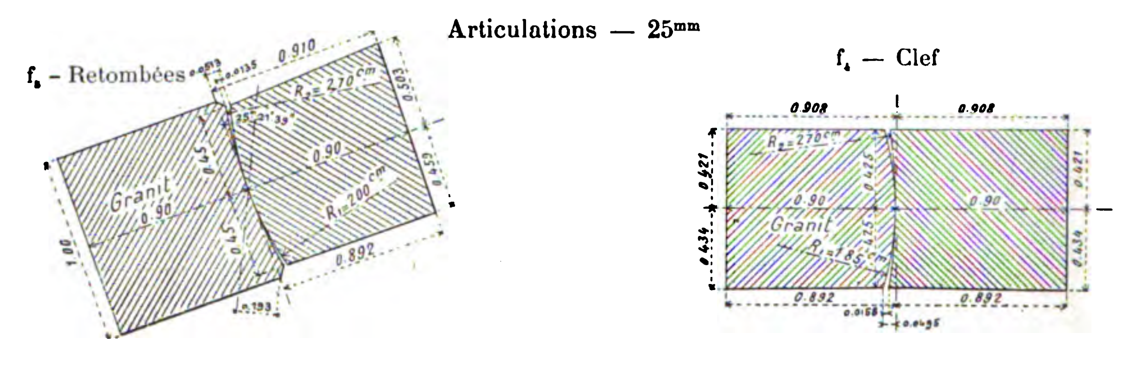
2. Articulations (f_4, f_5). — Elles sont du type arrêté et décrit par M. Köpcke[2], type « *qui s'est fort bien comporté dans nombre d'ouvrages* » (S_1).

Les faces courbes sont polies sur environ 50^{cm}.

Articulations — 25^{mm}

f_5 - Retombées

f_4 — Clef

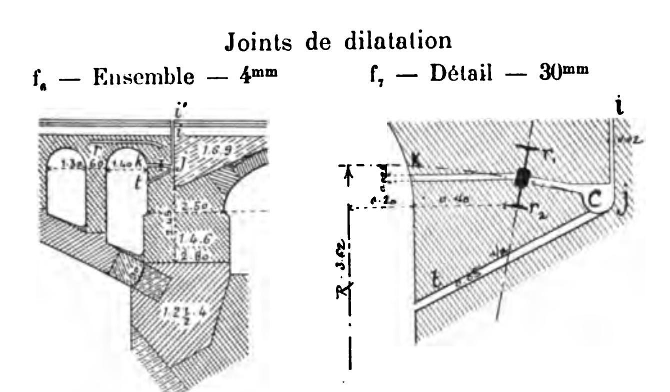


2. — Zeitschrift des Architekten-und Ingenieur-Vereins zu Hannover, — vol. XXXIV, - 1888, - p. 373 à 380 : « *Uber die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben* », vom Geh. Finanzrath C. Köpcke zu Dresden ».

3. Joints de dilatation (f_6, f_7). — La retombée sur la culée de la dernière voûte d'évidement est coupée par un joint vide *kjii'* (f_6).

Joints de dilatation

f_6 — Ensemble — 4^{mm} f_7 — Détail — 30^{mm}



6 coupons de vieux rails *r* (f_6) arrêtent la poussée.

Dans le béton sont encastrés deux vieux rails r_1, r_2 (f_7) ; leurs champignons, qui doivent glisser l'un sur l'autre, sont polis, – celui de r_1 suivant un plan, – celui de r_2 suivant un cylindre dont le rayon est la distance à la ligne de contact de la rotule des retombées.

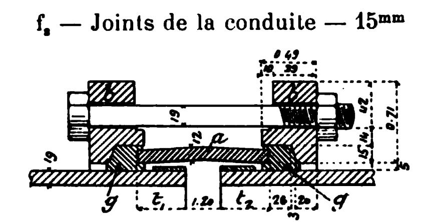
r_2, pris dans la culée, reste immobile avec elle.

r_1 est entraîné avec la grande voûte : il tourne autour de l'axe de la rotule de retombée, lequel n'est sans doute pas exactement fixe dans l'espace puisqu'il y a roulement, mais qu'on peut considérer comme tel.

4. Joints mobiles du tuyau de conduite d'eau. — Le pont porte la conduite d'alimentation de Hanovre.

Pour qu'elle puisse se dilater librement, et aussi pour suivre les mouvements de la voûte, elle est, au droit de chacune des 3 articulations, coupée par un joint mobile [3] ainsi disposé (f_8) : un anneau en fer forgé *a* recouvre l'intervalle de 20^{mm} à 30^{mm} entre les tuyaux t_1, t_2. Il est pris entre deux colliers de caoutchouc *g* par les anneaux de fonte *b*, serrés par des boulons.

f_8 — Joints de la conduite — 15^{mm}



5. Ecoulement des eaux. — Sur une couche de ciment, est posée une feuille de feutre de 4^{mm} entre deux couches de 3^{mm} d'un mélange d'asphalte, de mastic d'asphalte et de goudron de houille. Les eaux s'écoulent suivant l'axe du pont sous un fer Zorès entouré de gros graviers.

Au droit des joints de dilatation, la chape est renforcée de feuilles alternées de carton et de plomb, courbées pour en suivre le jeu. Le tout est protégé par un fer plat *f* (f_9).

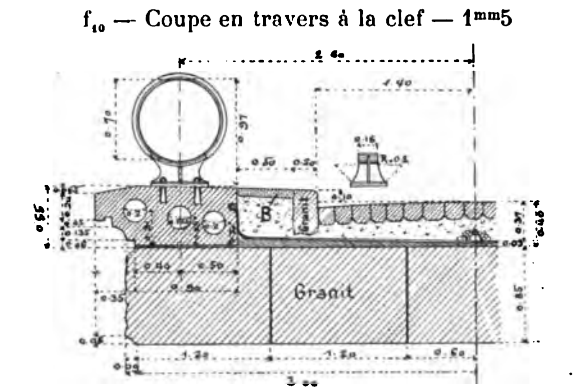
Si de l'eau entrait dans le joint de dilatation *i* (f_6, f_7, f_9), elle sortirait par le tuyau *t* (f_6, f_7).

f_9 — Chape au-dessus des joints de dilatation — 15^{mm}

Sous les voûtes d'évidement, une chape en ciment rejette l'eau vers les têtes.

3. — Système Ch. Gibault, employé sur nombre de conduites d'eau et d'air comprimé. Génie Civil, 21 janvier 1893, p. 181 à 187 : « *La dérivation de la Vigne* », R. Andras.

f_{10} — Coupe en travers à la clef — 1ᵐᵐ5



6. Chaussée et trottoirs (f_{10}).

La chaussée de 2ᵐ80 est en vieux pavés de la ville de Hanovre, avec joints bourrés de mastic d'asphalte (12ᵏ par m. q.).

La conduite est posée le long d'un trottoir : il y a la place pour en poser une autre le long de l'autre trottoir.

7. Plinthes et dés. —

Les plinthes sont en béton moulé. Leurs surfaces vues sont enduites de mortier coloré.

Les dés surmontant les pilastres sont aussi en béton moulé : leur noyau creux a été rempli de béton maigre.

8. Parements simulant le granit. —

On a donné l'aspect du granit aux têtes, et aux plinthes, en les lavant à l'acide chlorhydrique étendu, qui met à nu le gravier.

9. Matériaux.

A. Ciment. — On a employé pour le corps de l'ouvrage du ciment Portland « Vorwohler », et pour les têtes, du ciment « Stern » à cause de sa couleur.

B. Gravier du lit de la Leine. — Il contenait 0,4 de sable à arêtes vives et 0,6 de pierres de diverses grosseurs.

C. Pierre cassée. — Dans le basalte cassé, il y avait 45,5 % de vides.

D. Béton. — Le cahier des charges n'en fixait pas la composition. Il devait résister à la compression, à 28 jours :

pour les culées, à 124ᵏ ; pour les voûtes, à 207ᵏ.

Voici, avec les dosages adoptés, les densités et résistances (voir f_8).	Composition (fixée par l'Entreprise) Ciment 1ᵛᵒˡ — Sable	Pierre cassée	Gravier	Densité moyenne	Age moyen au moment de l'épreuve	Efforts moyens en kg/cm² produisant — des fissures	la rupture
Grande voûte	2ᵛ5	4ᵛ	»	2447ᵏ	96 j	214ᵏ	228ᵏ
Haut des culées de la grande voûte, sur 3ᵐ comptés suivant la courbe de pression					42 j	169ᵏ	178ᵏ
Voûtes de rive et haut de leurs culées	3ᵛ	4ᵛ5	»	2453ᵏ	94 j	226ᵏ	247ᵏ
Le reste des culées de la grande voûte	4ᵛ	»	6ᵛ	2267ᵏ	63 j	135ᵏ	138ᵏ
Piles-culées des voûtes de rive					119 j	124ᵏ	133ᵏ
Voûtes d'évidement, tympans					»	»	»
Remplissage sur les reins des voûtes de rive	6ᵛ	»	9ᵛ	»	»	»	»

Ces essais ont été faits au Laboratoire de Charlottenbourg, sur des cubes de 20cm et 40cm, en béton prélevé au moment de l'emploi.

Il était plus comprimé que le béton de l'ouvrage.

On a fait à la machine presque tout le béton de la grande voûte.

E. Granit des rotules. — C'est du granit bleu à grain fin des carrières d'Edenstetten (canton de Deggendorf, forêt de Bavière), étudié déjà par M. Max Leibbrand à l'occasion du projet de pont articulé, en béton, sur l'Eyach à Imnau, exécuté en 1896[4].

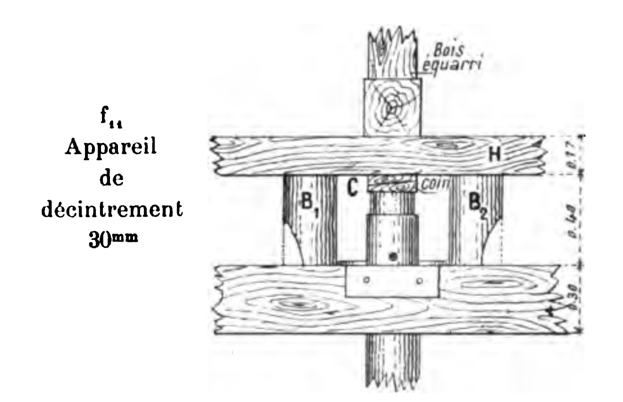
Des essais de résistance avaient alors été faits à Stuttgart par M. C. von Bach et à Munich par M. le Professeur Föppl[5].

On avait trouvé :

Densité moyenne		2.640k
Résistance moyenne, en kg/$\overline{0^m01}^2$:	à l'écrasement	1.099k
	à l'arrachement (éprouvettes de 100cmq de section moyenne)	46k9
	à la flexion (prismes de 105cm de long et 15cm × 15cm de section)	86k6
	au choc (cylindres de 40cm de long, 13cm de diamètre, prolongés à chaque extrémité par une partie prismatique de 15cm×15cm de section)	80k2

Aux essais faits à Stuttgart, sur des cylindres de granit de 50cm et 75cm de long, pour des efforts de 134k à 186k, les modules d'élasticité ont varié de $1{,}43 \times \overline{10}^9$ à $2{,}15 \times \overline{10}^9$.

10. Appareils de décintrement (f_{11}). — On devait, comme au pont de Claix[6], faire porter chaque poteau du cintre sur deux billots B_1, B_2 ; puis, la veille du décintrement, installer entre B_1 et B_2 une boîte à sable serrée contre la semelle H par des coins en chêne C ; enfin, au décintrement, ruiner d'abord B_1, B_2 à coups de hache, puis enlever le sable des boîtes.



f_{11}
Appareil de décintrement
30mm

Mais la semelle H étant trop faible avec 17cm, on fit porter chaque poteau du cintre sur 3 billots (B_1, B_2 et un 3e, B_3, entre eux). La veille du décintrement, on remplaça B_3 par une boîte à sable.

4. — arc de 30m au 1/10. — Zeitschrift für Bauwesen, 1898, p. 187 à 206, Pl. 26 : « *Betonbrücke mit « Granitgelenken über die Eyach bei Imnau in Hohenzollern* », vom Landesbaurat Max Leibbrand, mitgetheilt vom Ober-Ingenieur Alfred Gaedertz. (Voir Tome IV, Livre III).

5. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1897, n° 9, M. C. von Bach, - et Zeitschrift für Bauwesen, 1898 (article de M. Gaedertz, cité ci-dessus, renvoi 4).

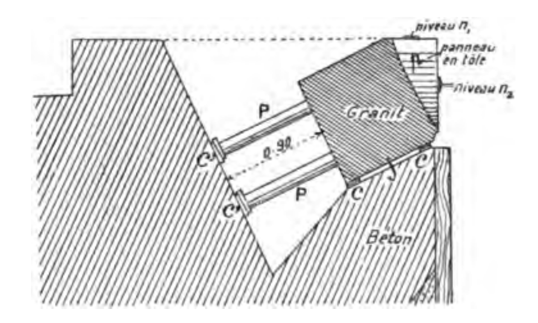
6. — Â¹ r^te (⩾ 40m)5 — Tome III.

Les boîtes à sable voisines des culées étaient à 0m70 en contrebas des autres : pour elles, on abaissa le niveau des eaux à l'intérieur d'un petit batardeau spécial (f_5).

11. Fondations. — On descendit, en épuisant à l'intérieur d'une enceinte de pieux de 8m50 et de palplanches de 8m et 0m16 d'épaisseur, dans le gravier sablonneux surmontant la marne. Les palplanches, trop minces, ne purent l'atteindre et on s'arrêta sur le gravier à 1m30 au-dessus.

12. Exécution de la grande voûte. — *A. Pose des rotules de retombées.* — *A_1. Pose des blocs concaves* (f_{11}). — En bétonnant les culées, on avait ménagé la place de ces blocs et, par derrière, un vide de 0m90.

f_{11} — Pose des blocs concaves des rotules de retombées — 15mm



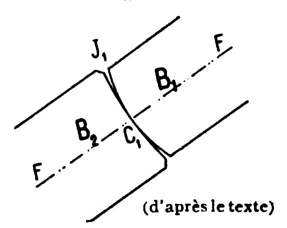
Ceux de rive droite avaient 1m de long et pesaient 2T4 ; ceux de rive gauche avaient 1m20 et pesaient 2T9.

Ils furent posés, à l'aide d'un panneau *p* en tôle d'acier de 1mm d'épaisseur, muni de deux niveaux n_1, n_2, sur 4 paires de coins en fer *c*, et soutenus par des poteaux P et des coins en bois *c'*.

Après la pose de toute la file, on mata avec un fer plat le joint inférieur *j* de 3cm environ, au mortier à l'état de terre humide ; puis on enleva les coins en fer *c* et on bétonna l'espace vide de 90cm en enlevant, au fur et à mesure, les poteaux P et les coins *c'*.

A_2. Pose des blocs convexes (f_{12}). — On avait calculé l'abaissement au décintrement ; on en avait déduit le roulement de B_1 sur B_2, puis la variation d'ouverture Δj_1 du joint j_1.

f_{12} — Pose des blocs convexes des rotules de retombées 15mm

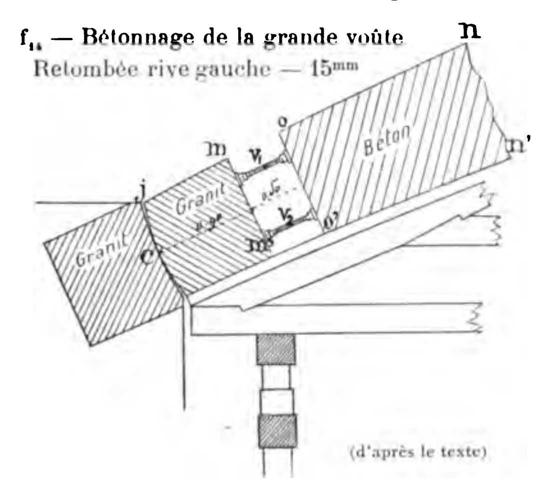


On connaissait donc la valeur de j_1 pour que le contact C_1 fût sur la fibre moyenne FF, et, par conséquent, l'ouverture avant mouvement $j_1 - \Delta j_1$; on l'a fixée par des coins en fer.

On a pu poser ainsi les rotules de telle sorte qu'après le mouvement, C_1 fût sur la fibre moyenne.

B. Bétonnage de la grande voûte. — Après la pose des rotules, le cintre fut chargé, sur 1m de hauteur, de sacs de gravier qu'on enlevait au fur et à mesure du bétonnage.

Immédiatement avant de poser le béton, on revêtait la douelle de 1 à 2^{cm} de mortier, afin de cacher les pierres du béton.

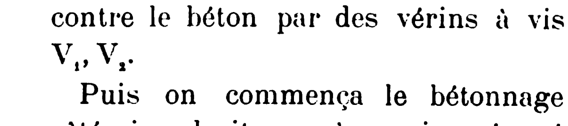


f_{14} — Bétonnage de la grande voûte
Retombée rive gauche — 15^{mm}

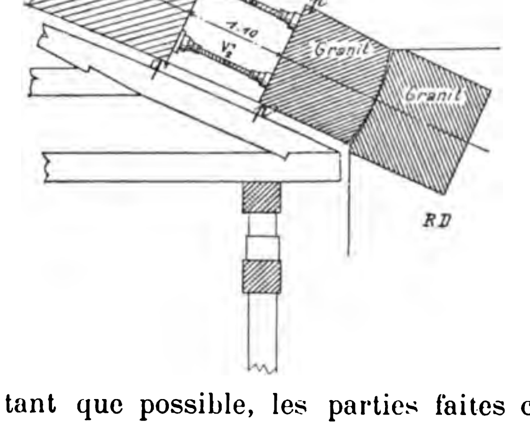
Après décintrement, on la dressait et on y étendait un lait de ciment.

Le 4 juillet 1900, on exécuta, côté rive gauche, une tranche *mm'nn'* (f_{14}) de 2^m35, appuyée sur le sommier supérieur de retombée.

Mais on constata le lendemain que, par suite d'un tassement du cintre, le joint sec *j* d'extrados entre les blocs de granit de la rotule, s'était ouvert de $4^{mm}5$, ce qui correspondait à un abaissement du point de contact *c* de 70^{mm}.



On enleva alors, non sans peine, sur 50^{cm}, le béton *mm'oo'* (f_{14}) en contact avec le bloc supérieur ; on remit le bloc exactement en place et on le pressa contre le béton par des vérins à vis V_1, V_2.



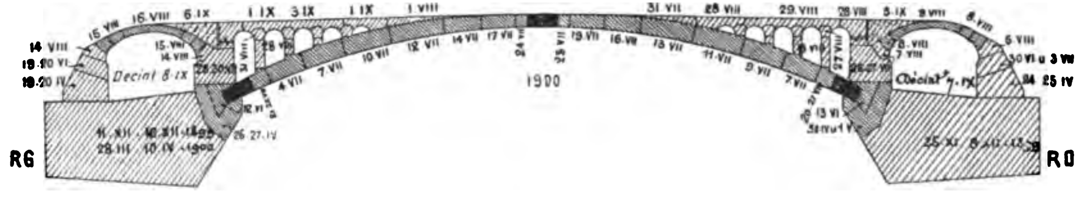
f_{15} - Bétonnage de la grande voûte
Retombée rive droite - 15^{mm}

Puis on commença le bétonnage côté rive droite, après avoir ménagé sur le bloc supérieur d'articulation un vide *pp'qq'* (f_{15}) de 1^m10, au moyen de vérins à vis V'_1, V'_2.

On continua alors, comme l'indique f_{16}, par tranches alternatives sur chaque demi-voûte, jusqu'à 0^m86 en arrière de la rotule de clef.

Le béton était pilonné par couches horizontales de 20^{cm} d'épaisseur. Autant que possible, les parties faites chaque jour étaient limitées normalement à la courbe de pression.

f_{16} — Dates d'exécution des différentes parties du pont — 2^{mm}



En même temps qu'on posait le béton, on pilonnait contre les cloisons de tête une couche de 8^{cm} environ de mortier composé de ciment coloré, de gravier de la haute vallée du Harz, et de sable blanc.

Avant de poser le béton frais, on lavait la surface du béton de la veille et on y projetait du mortier de ciment clair, qu'on étendait vigoureusement au balai.

C. Clavages. — C_1. - *aux retombées.* — Les vérins V_1, V_2 (f_{14}), V'_1, V'_2 (f_{15}) étant fortement serrés, on s'assura, en introduisant une lame d'acier de 2^cm de largeur et 0^mm2 d'épaisseur, que les blocs étaient en contact sur toute leur largeur.

On enlevait chaque rangée de vérins lorsque le béton était arrivé à sa hauteur.

Mais lorsqu'on lâcha les vérins supérieurs V_1, V'_1 (f_{14}, f_{15}), le joint d'extrados entre rotules s'écarta, les blocs tournant vers le bas.

On resserra les vérins V_1 (f_{14}) et on les entoura de cloisons de bois montant jusqu'à l'extrados. On bétonna entre les cloisons, puis on enleva les vérins et les cloisons et on remplit les vides.

C_2. - *à la clef.* — Après tassement au décintrement, l'intrados des blocs d'articulation de clef doit être un arc de cercle *abc* (f_{17}), et le point de contact C sur la fibre moyenne.

f_{17} - Comment doit être l'articulation de clef après décintrement — 15^mm



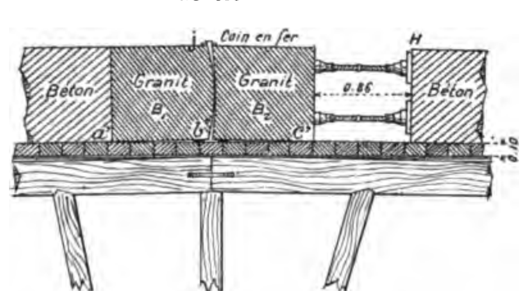
On posa ces blocs sur coins, de façon que leur intrados fût en ogive *a' b' c'* (f_{18}).

La largeur à l'extrados du joint sec *j* était maintenue par un coin de fer à la demande.

Les blocs convexes B_1 (f_{18}) furent posés comme les blocs concaves des retombées sur coins en fer, à l'aide d'un panneau en tôle ; puis on pilonna le béton par derrière.

Le lendemain, on posa les blocs concaves B_2 sur coins ; on les serra par des vérins et on clava la voûte à la clef.

f_{18} — Pose du bloc concave de l'articulation de clef — 15^mm



Au moment des clavages, le béton était âgé de :

13 jours à la retombée rive droite ;
17 jours à la retombée rive gauche ;
6 jours à la clef.

La pression des vérins était de 5000^k, répartie sur environ 650^cmq (surface d'appui des blocs de bois H) (f_{18}), soit environ 8^k/0^m01^2.

13. Construction des voûtes d'évidement et de décharge. —

Après le clavage, on construisit les voûtes d'évidement, les voûtes de décharge et leurs tympans.

Le rail supérieur du joint de dilatation (r_1 de f_7) fut posé à 1^cm en arrière de la position indiquée au projet, pour tenir compte des mouvements de la voûte au décintrement.

Le joint horizontal *kj* (f_6, f_7) fut ménagé au moyen d'une couche de 5^mm de sable.

Les surfaces de glissement se comportèrent bien au décintrement, quoique le béton des voûtes d'élégissement n'eût que 9 jours.

14. Décintrement. — On vida plus tôt et plus vite les boîtes du centre.

15. Tassements.

				Température moyenne en degrés Centig. — du jour de l'observation	Température moyenne en degrés Centig. — des 10 jours précédents	Tassements de la clef en m/m — partiels	Tassements de la clef en m/m — cumulés
du cintre (1900)	avant le bétonnage		au moment de la pose du cintre (surhaussé de 90mm)	»	»	0mm	
			26 juin – avant chargement du cintre	»	»	5	5mm
			2 juillet – après chargement	»	»	13	18
	pendant le bétonnage	de la grande voûte	13 juillet	»	»	4	22
			17 juillet	»	»	0	22
			26 juillet – (après clavage)	+ 28°	+ 23°	14	36
		des voûtes d'évidement	1er août	+ 19°	+ 21°	4	40
			11 août	+ 16°	+ 17°	2	42
			8 septembre	+ 16°	+ 16°	8	50
de la grande voûte	au décintrement (12 septembre 1900)		avant décintrement, les boîtes à sable mises en place	+ 14°	+ 15°	5	55
			après décintrement	+ 14°	+ 15°	24	79
	pendant l'achèvement du pont (1901)		19 janvier	0°	— 5°	32	111
			13 juillet (temps très sec)	+ 26°	+ 22°	–12 relèvement	99
			23 août	+ 20°	+ 20°	6	105

On n'a pas pu observer de mouvements horizontaux des culées.

16. Achèvement du pont. — Avant de poser la chape à la clef, on coula de l'asphalte chaud sur 8cm de profondeur à l'extrados du joint d'articulation.

On fit de même aux retombées : de plus, on boucha la partie inférieure du joint avec de la ficelle mince entourée d'une épaisse couche d'asphalte.

17. Dates.

		1899
Commencement des travaux		8 août
Construction des batardeaux	rive droite	30 août – 21 octobre
	rive gauche	23 août – 18 novembre
Bétonnage des culées	rive droite	25 novembre – 8 décembre
	rive gauche	11 et 12 décembre 1899 28 mars – 10 avril 1900

(Les travaux furent suspendus du 13 décembre 1899 au 28 mars 1900, à cause du froid, puis d'une crue).

			1900
Bétonnage de la voûte			4 – 25 juillet
Clavages	aux retombées	rive droite	20 – 21 juillet
		rive gauche	21 – 22 juillet
	à la clef		25 juillet
Décintrement			12 septembre

18. Dépenses. — L'ouvrage a été exécuté à forfait pour 91.700 marks (113.158^f), non compris les tuyaux, les murs en béton soutenant derrière les culées les tuyaux coudés, le pavage, le garde-corps, les remblais et quarts de cône.

19. Personnel.

Ingénieurs :

Direction générale : M. A. Bock, « Direktor der Städtischen Kanalisations- und Wasserwerke », à Hanovre.

Projet et Direction des travaux : M. C. Dolezaleck, « Ingenieur der Städtischen Kanalisations-und Wasserwerke » à Hanovre.

Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et photographies (S''_1) que m'a très aimablement adressés M. C. Dolezaleck, en avril 1910.

Les dessins sont extraits de S'_1, sauf f_{13}, f_{14}, f_{15}, f_{17} restitués d'après le texte.

S_2. — Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen 1901, p. 47 à 54 et 313 à 338, Pl. 3 et 4 : « *Brücke über die Leine bei Grasdorf* », MM. A. Bock et C. Dolezaleck.

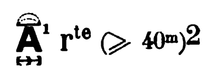
Le texte est extrait de S_2.

S_3. — Renseignements gracieusement communiqués par M. B. Liebold, en juillet 1910.

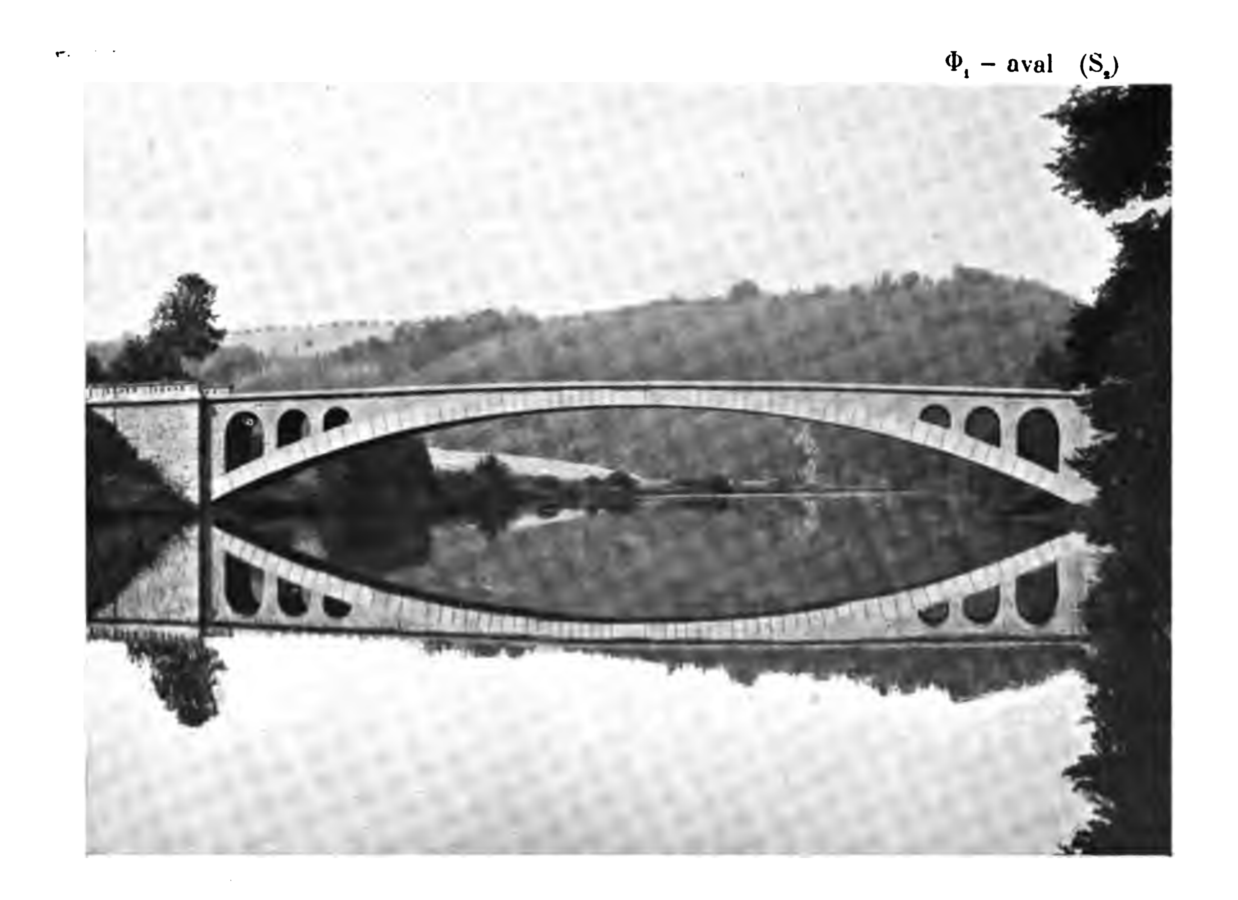
PONT SUR LA ZWICKAUER MULDE, PRÈS DE **GÖHREN** *(SAXE)*

Route de Göhren à Cossen

1903–1904



Φ_1 – aval (S_2)



1. Articulations (f_4, f_5).

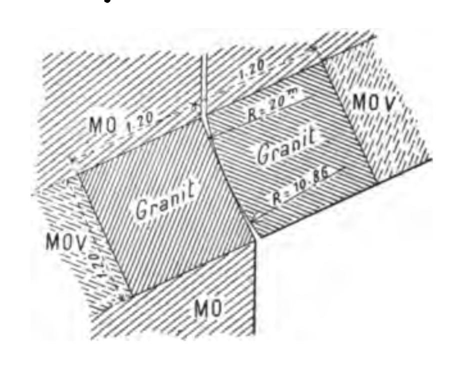
15mm

f_4 — Clef

1.10 1.10 MOV Granit Granit MOV R=20m R=9.85 1.10



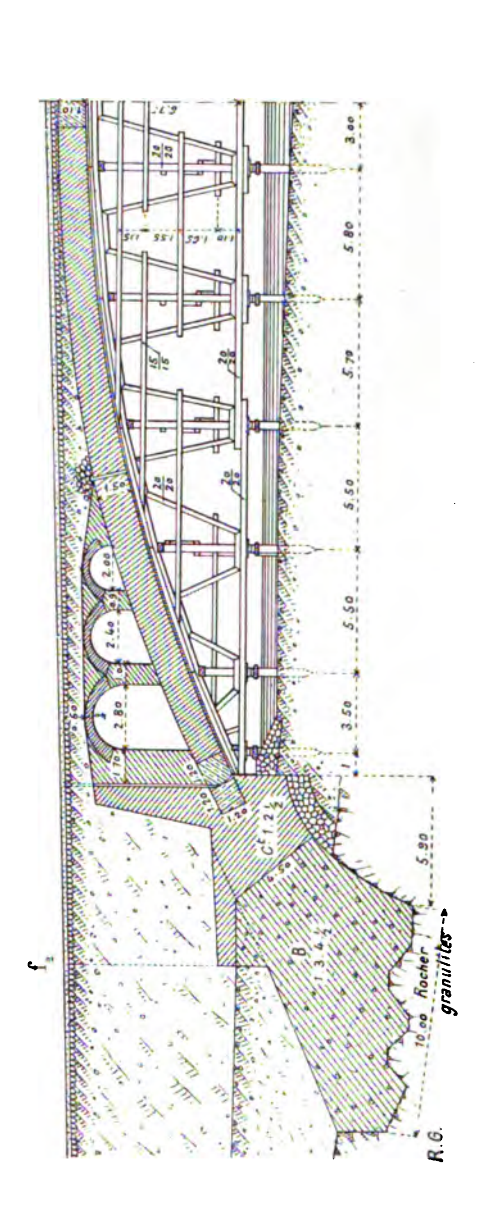
f_5 — Retombées



f_1 — Élévation — 2^{mm}

f_3

Coupes et cintre — 3^{mm}

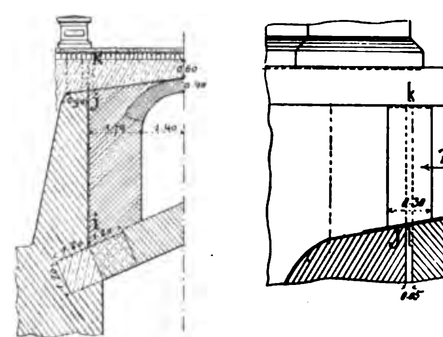


Φ₂ – aval (S₂)



2. Joints de dilatation au-dessus des articulations des naissances (f_6, f_7).

Joint de dilatation
f_6 — Ensemble — 4mm f_7 — Détail — 2cm



On a coupé la culée de la dernière voûte d'évidement par un joint vide vertical *ijk* (f_6) de 5cm, masqué en élévation par les murs en retour.

Le haut du joint *jk* est fermé par une feuille de zinc de 2mm d'épaisseur et 30cm de largeur, qui se relève le long du parement intérieur des tympans (f_7).

3. Matériaux et exécution de la voûte.

— On a d'abord étalé sur le platelage du cintre un lit de mortier : la douelle apparaît lisse, sans lits, ni joints.

Aux têtes, on a simulé[1], avec un mortier spécial, des joints de pierre de taille.

La voûte a été construite en 6 tronçons soutenus par des taquets en bois.

1. — Suivant les errements de la maison Liebold. Voir Pont de Plauen $\hat{\mathbf{A}}^1$ r[te] ($\geqslant$ 40m)10 ; Pont sur la Chemnitz $\hat{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)14 ; Ponts de Silésie $\hat{\mathbf{A}}^1$ r[te] ($\geqslant$ 40m)4 à 9 ; $\hat{\mathbf{A}}^n$ r[te] ($\geqslant$ 40m)5 et 6, Tome III.

4. Dates.

	1903
Commencement des travaux	25 mars
Fondations	6 avril — 10 juillet
Grande voûte	7 — 19 octobre
Décintrement	1er et 2 décembre
	1904
Ouverture à la circulation	16 juin

5. Cube de maçonnerie.

Voûte, sans les sommiers des articulations, — moellons ordinaires lités	431^mc
Autres maçonneries, — moellons ordinaires à ciment	885
Béton des culées (1^r, 3^r, 4^r5)	783
Total	2.099^mc

6. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

Direction des Travaux : M. Köhler, « Baurat, Vorstand der Strassen-u-Wasserbauinspektion », de Grimma ; M. Matthes « Bauinspektor ».

SOURCES :

S1. — Renseignements et dessins d'exécution gracieusement communiqués par M. le Directeur de la « Königliche Sächsische Wasserbaudirektion » à Dresde.

S2. — Ce que j'ai vu — août 1908.

PONT DE LA WALLSTRASSE, A ULM *(BAVIÈRE)*

PRÈS DE LA GARE, PAR DESSUS 13 VOIES DE CHEMIN DE FER

1904-1905 A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)3

Φ_1 (S_2)

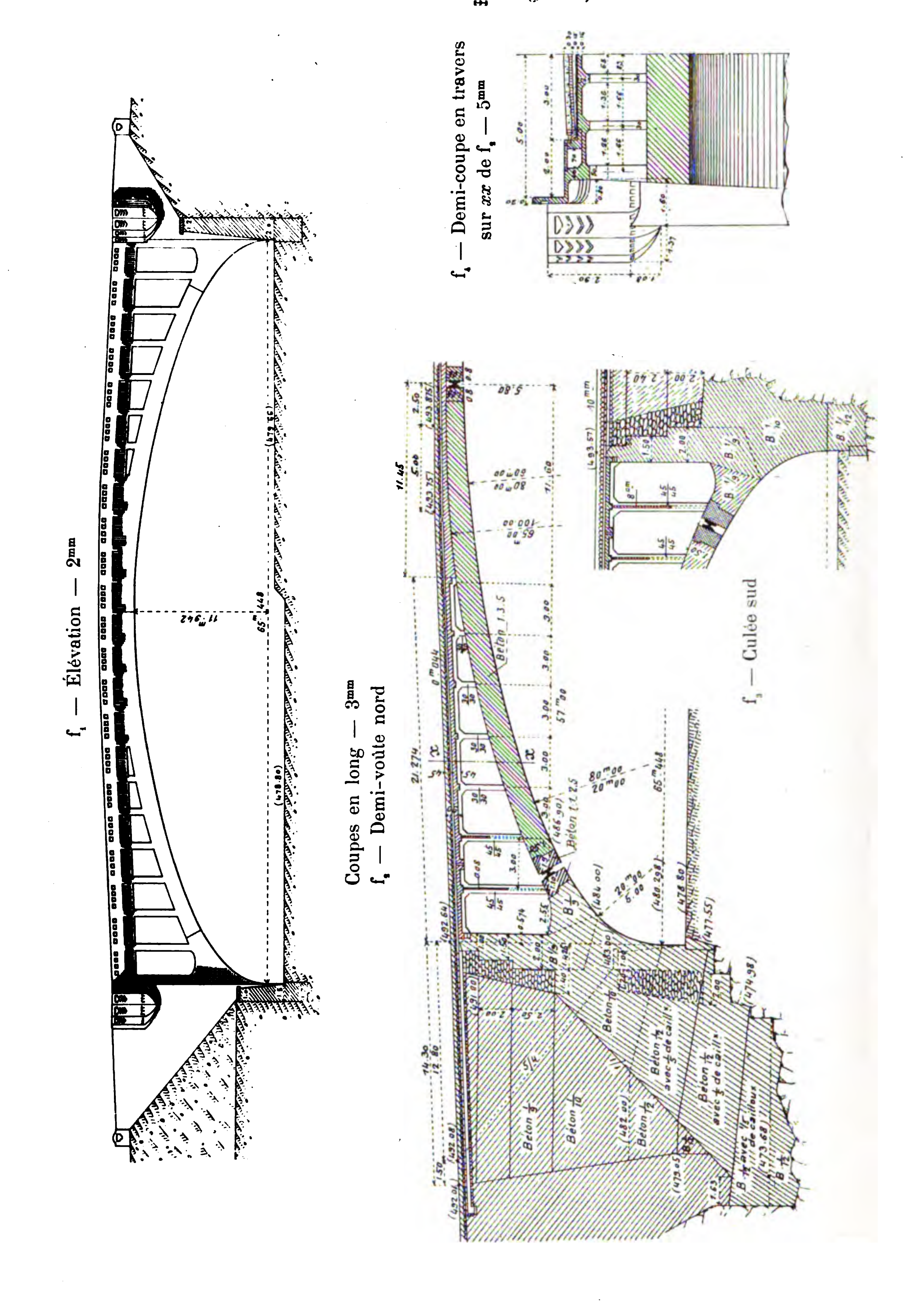


1. Matériaux employés. — La voûte est en béton, à 3 articulations en acier moulé.

La plate-forme et ses piliers, les consoles sous trottoirs, les parapets, sont en béton armé.

2. Tracé de la voûte. — La fibre moyenne est la courbe de pression sous le poids mort.

Aux retombées, on a raccordé l'intrados aux culées par un petit rayon : leurs rotules sont au-dessus de la fibre moyenne.

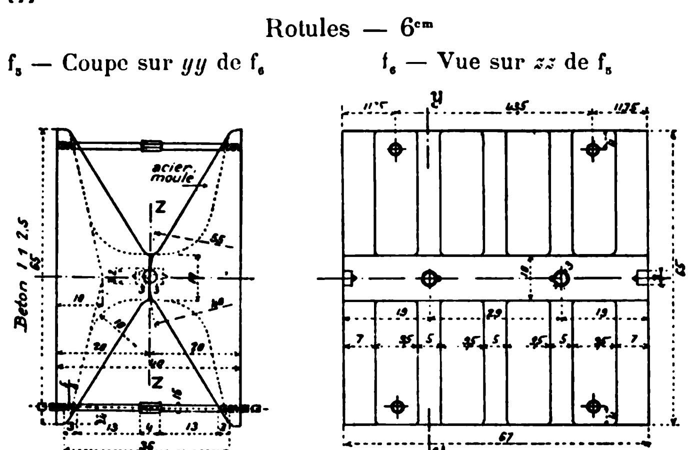


f1 — Élévation — 2mm

Coupes en long — 3mm
f2 — Demi-voûte nord

f3 — Culée sud

f4 — Demi-coupe en travers sur xx de f2 — 5mm



Rotules — 6cm

f_5 — Coupe sur *yy* de f_6 f_6 — Vue sur *zz* de f_5

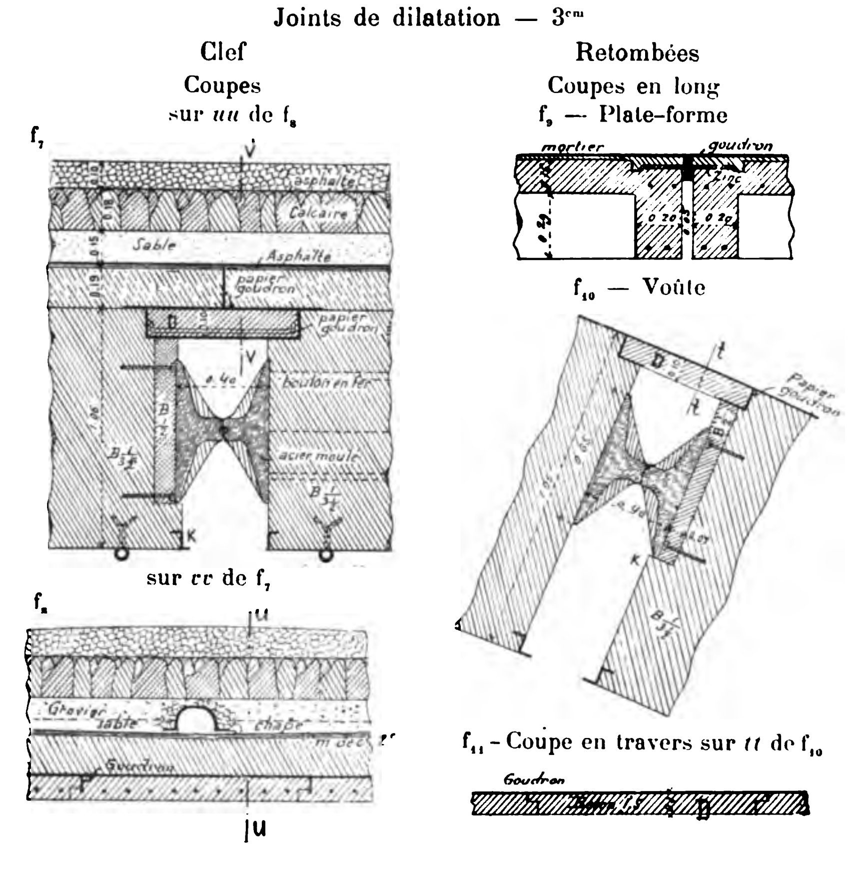
3. Articulations (f_5, f_6). — Pour empêcher les blocs d'échapper l'un à l'autre, tout en leur permettant de rouler l'un sur l'autre, on les a réunis par deux goujons d'acier de 30mm de diamètre, fixés à l'un d'eux, et pénétrant avec jeu dans l'autre.

On voit les rotules en douelle; elles sont masquées aux têtes par un mince placage en béton, de 14cm à 15cm d'épaisseur.

4. Élégissement des tympans (f_1 à f_4). — Le tablier, en béton armé de 16cm, repose sur des piliers en béton armé de 30cm × 30cm à 45cm × 45cm. Il n'est pas armé au cerveau.

On a, pour l'aspect, élargi à 60cm les faces des piliers de tête.

5. Chape (f_7, f_8). — Le tablier est recouvert de 2cm de mortier de ciment à deux pentes versant vers l'axe, et d'une chape Siebel[1].



Joints de dilatation — 3cm

Clef — Coupes sur *uu* de f_8 (f_7); sur *vv* de f_7 (f_8)

Retombées — Coupes en long — f_9 — Plate-forme; f_{10} — Voûte

f_{11} - Coupe en travers sur *tt* de f_{10}

6. Joints de dilatation (f_7 à f_{11})

Aux retombées, le haut des joints de dilatation du tablier est recouvert d'une feuille de zinc recourbée, dans le creux de laquelle on a versé du goudron (f_9).

La console de clef est coupée par le joint d'articulation.

1. Feuilles de plomb et feutre asphalté.

7. Trottoirs. — Ils sont en béton armé, sur consoles en béton armé, saillant de 0^m80.

Cette saillie, rationnelle, fait bon effet (S_1).

8. Parapet. — Le parapet, en béton armé, est plein, avec quelques dessins en creux pour en accidenter la surface : il eût peut-être convenu de l'ajourer.

Malgré les joints ménagés, on y remarque (août 1908) quelques minces fentes verticales aux angles des culs-de-lampe et en quelques autres points.

9. Culées. — Elles n'ont pas de plinthe : on ne la regrette pas.

Leurs culs-de-lampe sont un peu lourds.

10. Aspect du pont (S_1). — Pas d'arêtes vives : on a, par exemple, arrondi en rayon de 10^{cm} les arêtes d'intrados et d'extrados de la voûte.

Tout le pont est enduit du même badigeon blanc.

Il est moulé, et le paraît.

11. Béton. — *A. - Pierre cassée.* — Les pierres calcaires pour le béton s'écrasaient de 560^k à 840^k; les plus dures étaient réservées à la voûte et cassées à part.

Le concasseur fournissait 4 à 5^{mc} par heure, et donnait :

55 °/₀ de pierre de 15^{mm} à 40^{mm} de grosseur ;
25 °/₀ de gravier de 8^{mm} à 15^{mm};
20 °/₀ de sable rouge, dur, de 0 à 8^{mm}.

B. - Dosages.	1 vol. Ciment de Blaubeuren, qualité « Brückencement » — Sable — Dosage en vol.	Sable — Provenance	Pierre cassée — Dosage en vol.	Pierre cassée — Nature de la pierre	*Consistance du béton*
Voûte	3^v	Danube	5^v	Pierre et gravier calcaires, durs	*Terre humide*
Près des rotules	1^v	Danube	2^v5	Porphyre lavé de Dossenheim (Bade)	*Terre humide*
Béton armé	4^v5	Gravier broyé	»	»	*Fluide épais*

*C. - **Essais**, faits à l'Ecole Polytechnique de Stuttgart, pendant la construction, sur du béton pris à la bétonnière.*

	Composition du béton Ciment Portland : 1^v — Sable	Pierre cassée	Mode de fabrication	*Age en jours*	Densité	Résistance à l'écrasement en Kg/$\overline{0^m01}^2$
Culées	2^v25 Pfühl	6^v75 Calcaire tendre	Machine	*64 j*	2 25	200^k
	2^v25 Pfühl	6^v75 Gravier du Danube, cassé	—	*66*	2 41	277^k
	2^v25 Danube	7^v75 Calcaire tendre	—	*81*	2 37	264^k
Voûte	3^v Danube	5^v Calcaire dur	—	*57*	2 42	346^k
Près des articulations (f_{19}, f_{20})	1^v Danube	2^v5 Gravier porphyrique en 5 grosseurs de 3 à 35^{mm}, lavé	—	*44*	2 30	410^k
				63	2 31	475^k
Clavage derrière les rotules (f_{19}, f_{20})	0^v5 Danube (lavé)	1^v5 Gravier porphyrique, jusqu'à 8^{mm}	Main	*37*	2 22	373^k

*D. - **Mortier des parements.*** — Tous les parements en élévation sont en un mortier, jouant la pierre, dont voici la composition :

Portland	1^v
Sable rouge dur	1^v5
Sable blanc tendre (pour avoir un ton clair)	2^v

Il était appliqué plastique.

12. Cintre (f_{11} à f_{17}). — Le sable des boîtes (quartz à grains fins) était grillé : pour le maintenir sec, on remplissait de goudron l'intervalle entre le piston et la boîte. Une toile à voile entourait le tout.

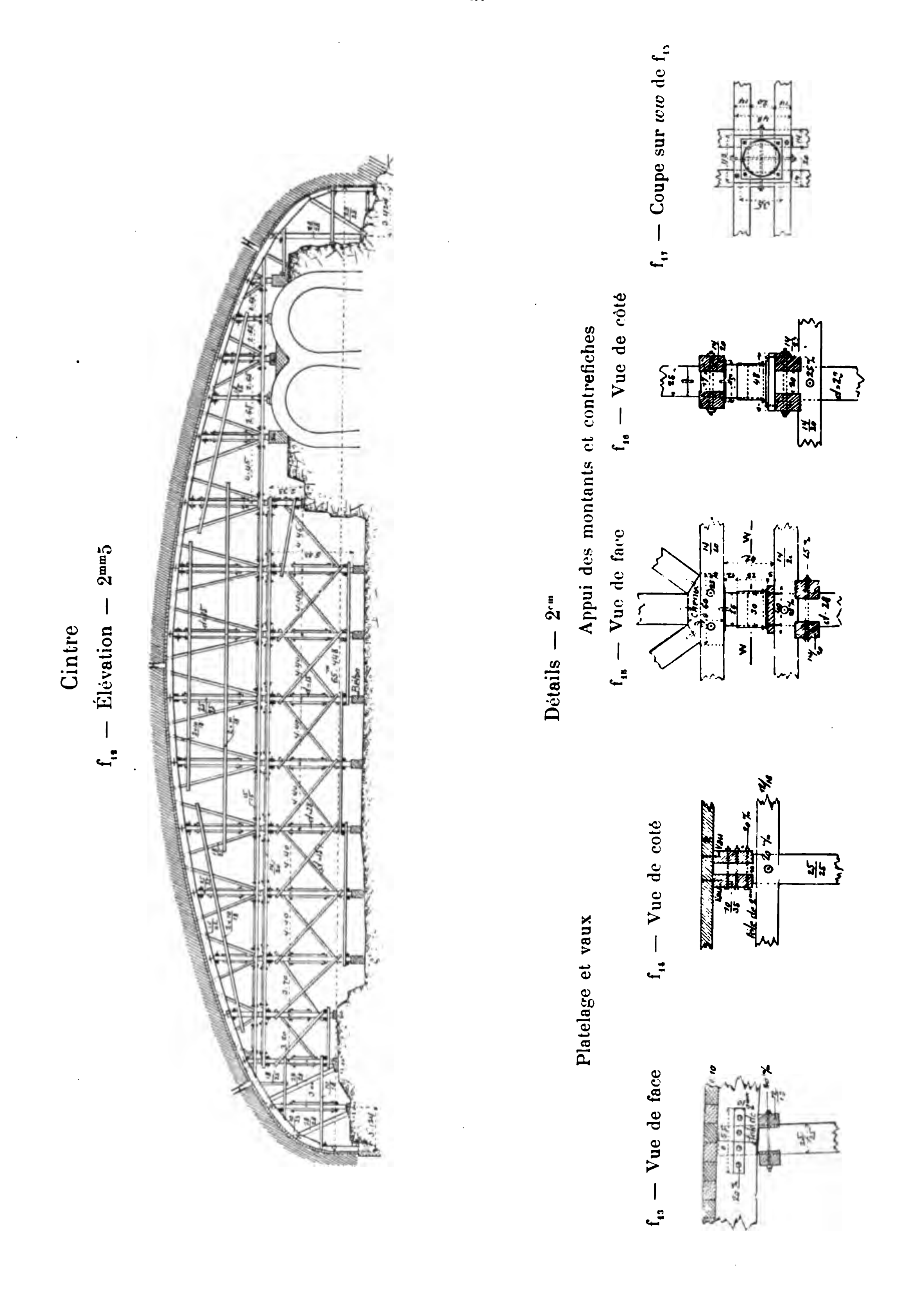
Dans le calcul, on admettait un effort de 60^k suivant le sens des fibres, de 20^k normalement aux fibres.

Pour tenir compte des trépidations pendant le pilonnage, on a majoré de 50 % le poids de la voûte.

13. Fondations. — On a noyé les redans taillés dans le rocher avec du béton à 1^v de ciment pour 12^v de sable et pierre cassée ; puis on a posé le béton du corps des culées, en le pilonnant par couches en forme de coin de 20^{cm} à 25^{cm} d'épaisseur : on a noyé dans le bas 1/5 de pierres (f_2).

Le béton était presque plastique.

On en posait chaque jour de 55^{mc} à 90^{mc}.



Cintre

f_{12} — Élévation — 2mm5

Détails — 2cm

Platelage et vaux

f_{13} — Vue de face

f_{14} — Vue de coté

Appui des montants et contrefiches

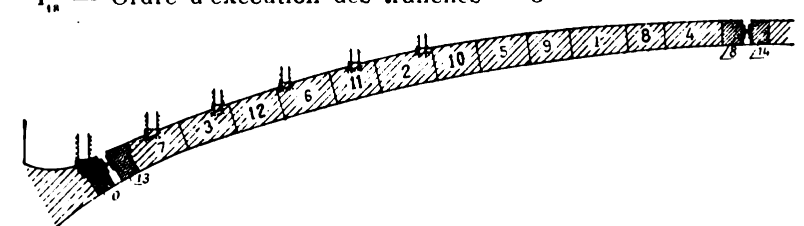
f_{15} — Vue de face

f_{16} — Vue de coté

f_{17} — Coupe sur *ww* de f_{15}

14. Exécution de la grande voûte (f_{18}). — Chaque demi-voûte était divisée en 14 tranches alternées, les unes plus épaisses, ayant leur axe au-dessus des montants du cintre, les autres un peu plus minces.

f_{18} — Ordre d'exécution des tranches — 3mm



En un jour, on pouvait poser une tranche et sa symétrique (55^{mc} à 75^{mc}).

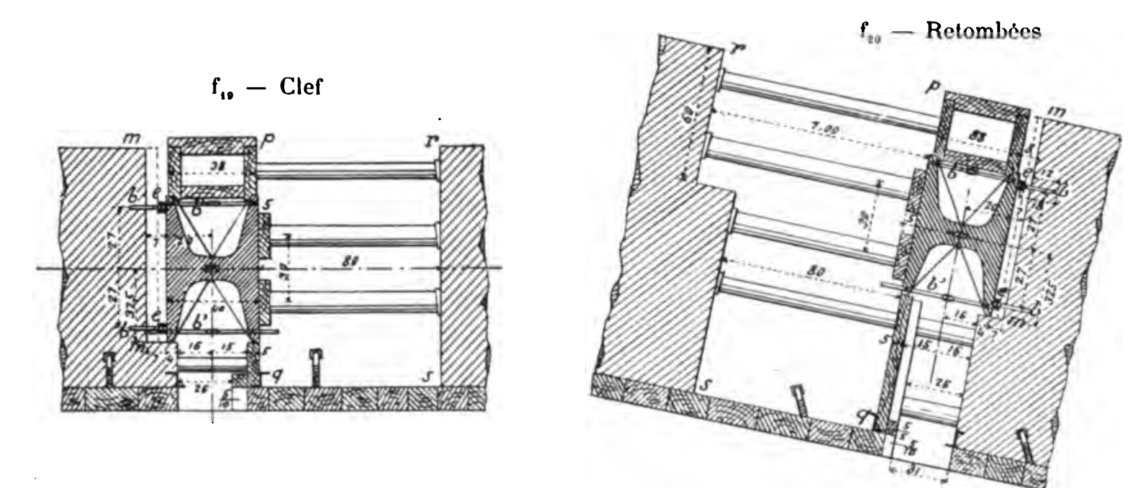
On bétonna d'abord les tranches épaisses, puis leurs intervalles. On maintint ouverte une des tranches voisines de l'articulation de clef, pendant 8 jours après l'achèvement du reste.

Pour le mortier de parement à 1/3,5, on avait disposé, à 8^{cm} en arrière des cloisons de tête, d'autres cloisons en tôle de 40^{cm} de hauteur; on y pilonnait le mortier en même temps que le béton du corps de la voûte; puis on enlevait de suite les tôles.

Ce mortier devait être posé presque plastique, bien pilonné et soigneusement arrosé après l'enlèvement des cloisons.

15. Pose des rotules. — On avait arrêté le béton des tranches 0 et 8 (f_{18}), à 7^{cm} des rotules (f_{19}, f_{20}) : on y avait fixé des boulons *b* (4 par rotule), portant

Pose des rotules — 30mm



des écrous *e*, vissés de façon à se trouver exactement dans le plan d'appui des rotules.

Pour mettre celles-ci en place, on solidarisait leurs sommiers par 4 boulons *b'*, qu'on sciera plus tard, avant le décintrement.

On appuyait le bloc ainsi formé contre les 4 écrous *ee*, après avoir bétonné l'intervalle *pqrs* (tranches 13 et 14 de f_{18}). On pilonnait, dans l'intervalle de 7^{cm} resté vide *mm*, du mortier à 1v de Portland et 2v de sable porphyrique.

A l'extrados, l'intervalle au-dessus des rotules est recouvert par des dalles de béton D (f_7, f_{10}, f_{11}) à joints remplis de goudron.

Les 39 rotules furent posées en une semaine par 3 hommes.

On construisit la voûte en 15 jours (770^{mc} de béton, 28^T5 d'acier des rotules).

16. Décintrement.

— A la clef, la chaleur avait un peu détaché la voûte du platelage.

On plaça deux hommes à chacune des 104 boîtes.

On a d'abord abaissé le sable de 3^{mm} dans toutes les boîtes, puis de 5^{mm} au cerveau seulement, puis encore de 3^{mm} à toutes les boîtes ; enfin, on abaissa complètement les pistons des reins.

17. Mouvements dûs à la température

(observations faites à la clef, sur le trottoir Est).

Date de l'observation	Température en ° C.	Niveau de la clef au-dessous de la cote prise avant décintrement
4 août 1905	+ 27°	$4^{mm}5$
4 janvier 1906	− 12°	53^{mm}

La clef a donc baissé de $48^{mm}5$ pour un abaissement de température de 39°. [2]

18. Dates.

Commencement des travaux.................. fin de l'automne 1904
Commencement du bétonnage de la voûte...... 29 avril 1905
Ouverture à la circulation..................... milieu d'octobre 1905

19. Personnel.

— Le pont a été construit par les Chemins de fer de l'Etat de Wurtemberg.

Projet, Calculs, Direction des Travaux :

Direction Générale : M. Neuffer, « Ober-Baurat » à Stuttgart.

Direction locale : M. Lupfer « Eisenbahnbauinspektor » ; — M. Barth « Regierungs-Bauführer ».

Architecture : M. Bonatz, Architecte, de l'Ecole Polytechnique de Stuttgart.

Entrepreneurs : MM. A. Kunz et Cie, de Kempten.

2. — La formule : $\delta b \left(\begin{array}{c}\text{tassement dû à une}\\ \text{variation}\\ \text{de température } \tau_0\end{array}\right) = \alpha \left(\begin{array}{c}\text{coefficient}\\ \text{de dilatation}\\ \text{du béton}\end{array}\right) \tau_0 \left[b \text{ (montée)} + \frac{[a \text{ (demi-portée)}]^2}{b} \right]$

donne pour : $\alpha = 8{,}8 \times 10^{-6}$, $\tau_0 = 39°$, $b = 5^m80$, $2a = 57^m$: $\delta b = 50^{mm}$ (S_2).

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution gracieusement communiqués par M. Neuffer, en juin 1909.

S_2. — Deutsche Bauzeitung (Mitteilungen über Zement, Beton und Eisenbetonbau), 1907, 9 janvier, p. 1 à 4 ; — 23 janvier, p. 7 et 8 ; — 6 février, p. 11 et 12 : « *Die Wallstrassenbrücke* « *in Ulm a. D.* », Ober-Baurat Neuffer in Stuttgart.

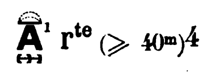
S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_3 est de S_2.
Les dessins sont réduits de S_1.

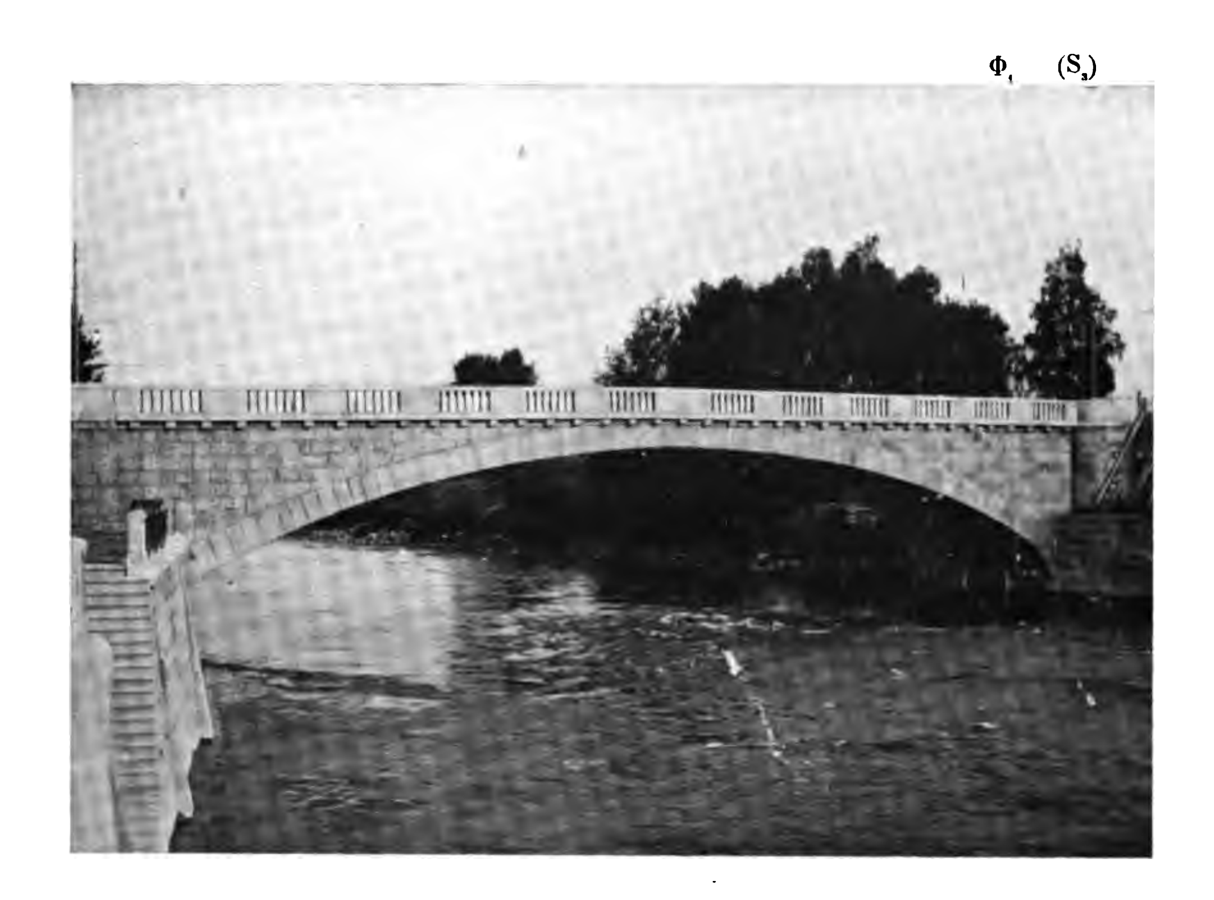
PONT ÉLISE, SUR LE BRAS DROIT DU DANUBE, A NEUBOURG[1] *(BAVIÈRE*

Route de Neubourg à Ingolstadt

1906–1907



Φ₁ (S₃)

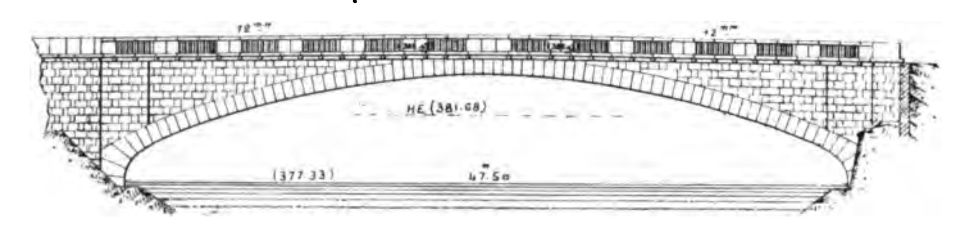


1. Dates (S"₁).

Commencement des travaux........................	7 novembre 1906
Fondations..	14 décembre 1906 – 18 avril 1907
Grande voûte......................................	12-20 septembre 1907
Décintrement......................................	31 octobre 1907
Ouverture à la circulation.........................	14 décembre 1907

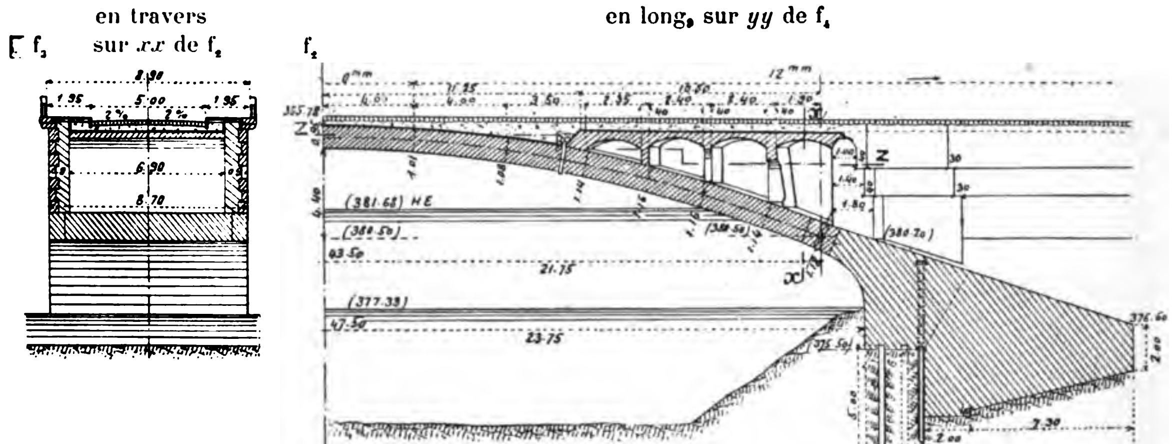
1. — Neuburg a. Donau.

f₁ — Élévation — 2mm

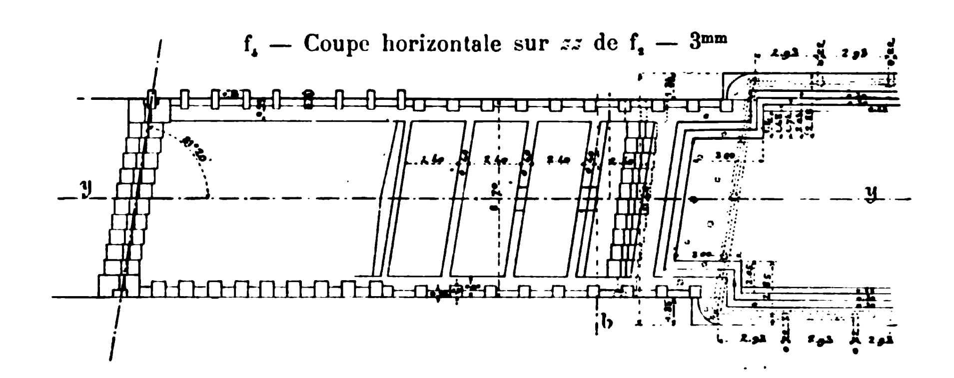


Coupes — 3mm

f₃ en travers sur xx de f₂ | f₂ en long, sur yy de f₄

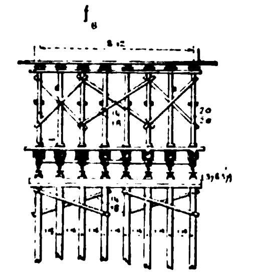


f₄ — Coupe horizontale sur zz de f₂ — 3mm

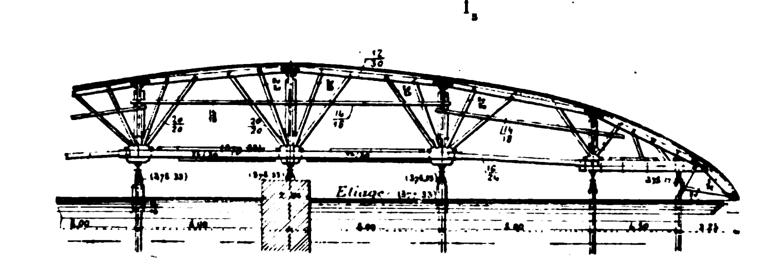


Cintre — 2mm5

f₆



f₅



2. Mouvements de la clef pendant la construction et après (S_2)

Mouvements de la clef en *mm* par rapport à son niveau avant décintrement

avant décintrem.t

après décintrem.t

f_2

Températures en ° Centigrades
- de l'air (moyenne du matin et du soir)
- de l'eau du Danube

Temps
- gris
- beau

Août | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet

3. Personnel (S"$_1$). — *Projet et Entreprise :* MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Direction des Travaux : M. Egler, « K. Baurat » du « K. Strassen-und Flussbauamt » de Neubourg.

SOURCES :

S$_1$. — Dessins d'exécution (S'$_1$) et renseignements (S"$_1$) qu'ont bien voulu me donner MM. Sager et Wœrner.

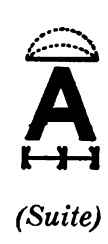
S$_2$. — Graphique que m'a gracieusement remis, à Munich, M. Probst, Ingénieur en Chef de l'Entreprise Sager et Wœrner.

S$_3$. — Ce que j'ai vu — août 1908.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]



[1]

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série A[1] F^{r} ($\geqslant 40^{m}$) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
	Longueur *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { entre parapets { *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	INTRADOS { Portée { *Montée* { Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES { Clef { *Joints de rupture* { Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/$\overline{0^{m}01}^2$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
d' **Illerbeuren** *Bavière* 1903-1904	*88m 80* RG 22mm5 RD	{ 4m 60 { *4m 00* Fruit : 1/20	Entre culées : Anse de panier à 7 centres Portée : **59m,00** Entre rotules : Arc d'anse de panier à 5 centres { **57m,164** { *9m 817* { $\frac{1}{5,82}$ = 0,171 *Rayons :*	{ 1m,10 { *RG* *1m 63* { *RD* *1m 65* { 1m 40	Acier moulé	B [1] damé Ciment......... 1v Sable .... 2v5 Gravier cassé.. 5v fait à la machine 240k à 28 j. Sommiers d'articulations : B [1] moulé Ciment......... 1v Sable . ... 1v5 Gravier cassé.. 1v5	Pression maxima dans la voûte, pour la position la plus défavorable de la surcharge : 31k Pas de tension Surcharge : 2 locomotives puis, des wagons Par mct : Locomotives 4400k Wagons 3500k	1° 10 voûtes transversales vues, en plein cintre de 2m35, sur piles de 0m70, 0m75, 0m80, traversées par une voûte longitudinale en ogive de 1m30
$\hat{A}^{1}$ Fr (⩾ 40m)[1]	14m 50	0m55	*à partir de la clef :* *RG* | *RD* *m* | *m* *48,25* | *41,80* | *53,85* *41,885* | *43,75* *au-dessous des rotules :* *4,81* | *4,67*			Ciment Dyckerhoff et fils à Mannheim		2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

A VOIE NORMALE SÉRIE $\overset{\frown}{A}^1$ Fr (⩾40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/$\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne dure « Flinz » RG – 4m50 RD – 4m80 Pression maxima : 3k4 - *Peu épuisements*	Fixe Montants et contrefiches *Sapin* Vérins soulagés pendant le bétonnage par des coins	5 *Etage supérieur* 20c *Etage inférieur* 26c 1m28 *60mm*	294mc » 24700f env.	0mc89 » 75f8	A pleine épaisseur, en 14 tranches de 4m de largeur	Voûtes d'évidement achevées *30 jours* 2 et 3 novembre	t_c = 15mm jusqu'au clavage t'_v = 9mm avant de desserrer les vérins des retombées Au décintrement, les rotules de retombées glissèrent de 10 et 18mm	Q = 2404mc Q : S_p = 5mc88 Q : W = 0mc46 D = 112 294f D : S_p = 274f9 D : W = 21f7 D : Q = 46f7

[2] Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. [3] S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
[4] W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. [5] W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES — ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

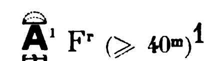
PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)

MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ILLER, A ILLERBEUREN [1] *(ALLEMAGNE - Souabe bavaroise)*

Chemin de fer d'intérêt local [2] de Legau à Memmingen

1903–1904 

Φ_1 (S_1)



1. Le pont est en béton. — Tout est en béton,

soit coulé en place : grande et petites voûtes, culées, pilastres à refends horizontaux jouant la pierre de taille ;

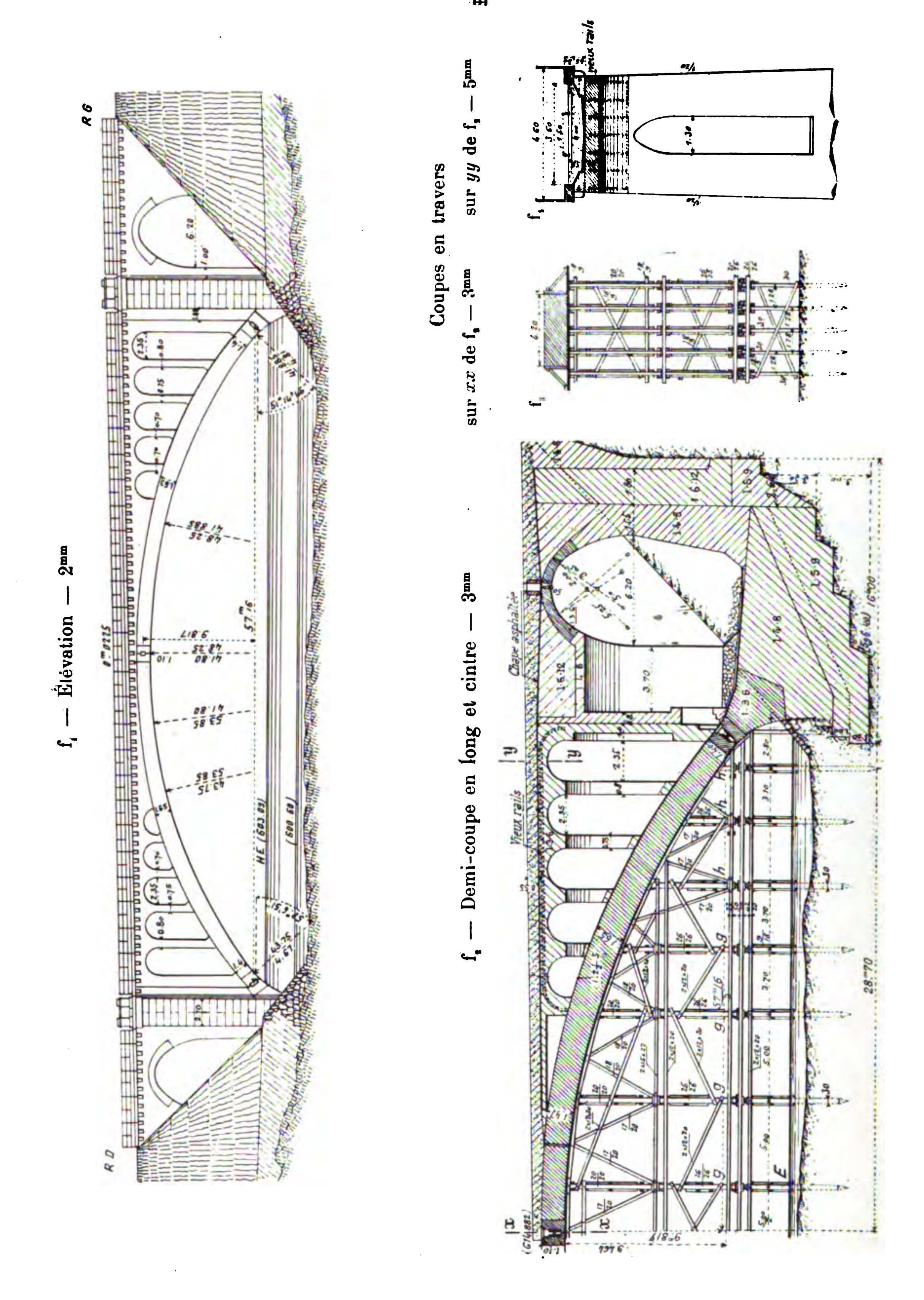
soit moulé à l'avance : sommiers des rotules, plinthes, consoles.

On l'a employé par économie [3] : on avait, tout près, de bon sable et de bon gravier.

1. — Entre les stations de Lautrach et d'Illerbeuren, à 200^m environ de celle-ci. Il semble plus naturel de l'appeler « Pont d'Illerbeuren » que « Pont de Lautrach ».

2. — A voie de 1^m50.

3. — L'ouvrage a coûté 112.294^f ; en métal, il eût coûté 135.740^f (S_1).



f_1 — Élévation — 2mm

Coupes en travers sur xx de f_2 — 3mm sur yy de f_2 — 5mm

f_2 — Demi-coupe en long et cintre — 3mm

2. Quelques observations. — On a tenu compte de la pente ($22^{mm}5$) dans les rayons d'intrados et l'épaisseur au joint de rupture de chaque demi-voûte.

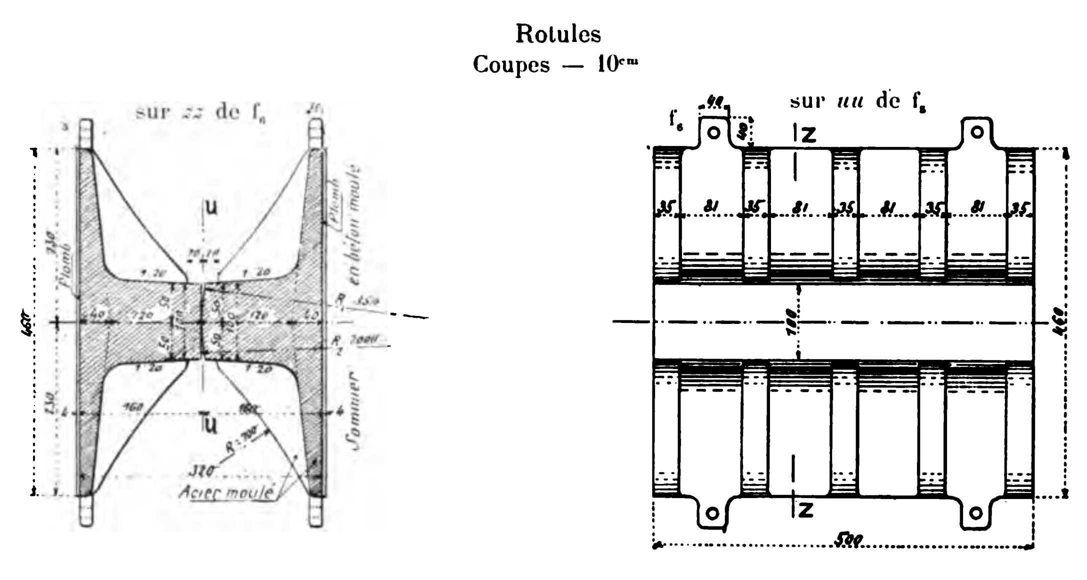
Les voûtes qui traversent les culées sont en ellipse surhaussée : leurs bandeaux n'ont été dessinés qu'au-dessus des reins.

On a sagement montré les voûtes et leurs têtes telles qu'elles ont été moulées (S_3).

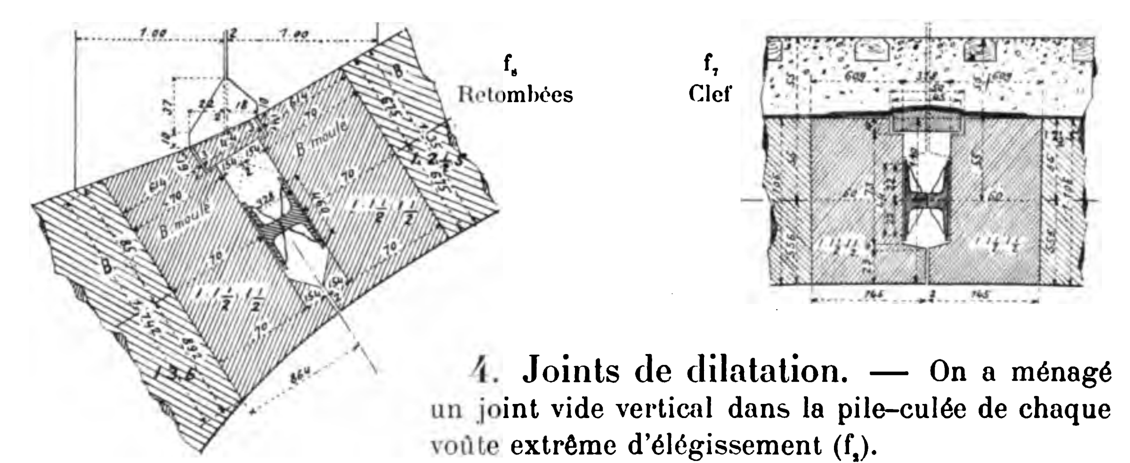
3. Articulations. — Elles sont cachées aux têtes et en douelle.

L'eau qui en tombe a tracé sur le sol une ligne de rouille (S_3).

Rotules
Coupes — 10^{cm}



Rotules et sommiers — 2^{cm}



4. Joints de dilatation. — On a ménagé un joint vide vertical dans la pile-culée de chaque voûte extrême d'élégissement (f_3).

Les voûtes d'élégissement sont armées, en long, de 7 vieux rails espacés de 0^m57, dont les abouts sont réunis par des fers ronds de 3^{cm} (f_3, f_4). Ils absorbent la poussée de la dernière voûte.

5. Chapes. — Le béton sous ballast est recouvert de feutre asphalté ; par-dessus, de sable.

L'extrados de la grande voûte sous les petites a été revêtu de ciment, puis d'asphalte (le soleil l'a fait couler).

A quelques places, l'eau a traversé la grande voûte et enlevé le mortier (S_2).

Φ_2 (S_2)



6. Composition et volume des bétons

(voir f_1).

	Pour 1vol de ciment			Cube
	Sable	Gravier cassé		
		Dosage	Grosseur maxima	
Grande voûte (résistance imposée à 28 jours : 240k)..	$2^{v}5$	5^{v}	$3^{c}5$	*387mc*
Blocs de béton moulé : sommiers des articulations (résistance : 300k)	$1^{v}5$	$1^{v}5$	$3^{c}5$	*33mc*
Partie des culées sous les retombées ; voûtes de décharge et d'évidement	3^{v}	6^{v}	$3^{c}5$	*376mc*
Culées de la grande voûte et des voûtes de décharge.	4^{v}	8^{v}	$3^{c}5$	*948mc*
Fondations	5^{v}	9^{v}	$4^{c}5$	*476mc*
Remplissage	6^{v}	12^{v}		*128mc*
Consoles, dalles, dés	$1^{v}5$	$3^{v}75$	$3^{c}5$	*56mc*

Tout le béton a été fait à la machine.

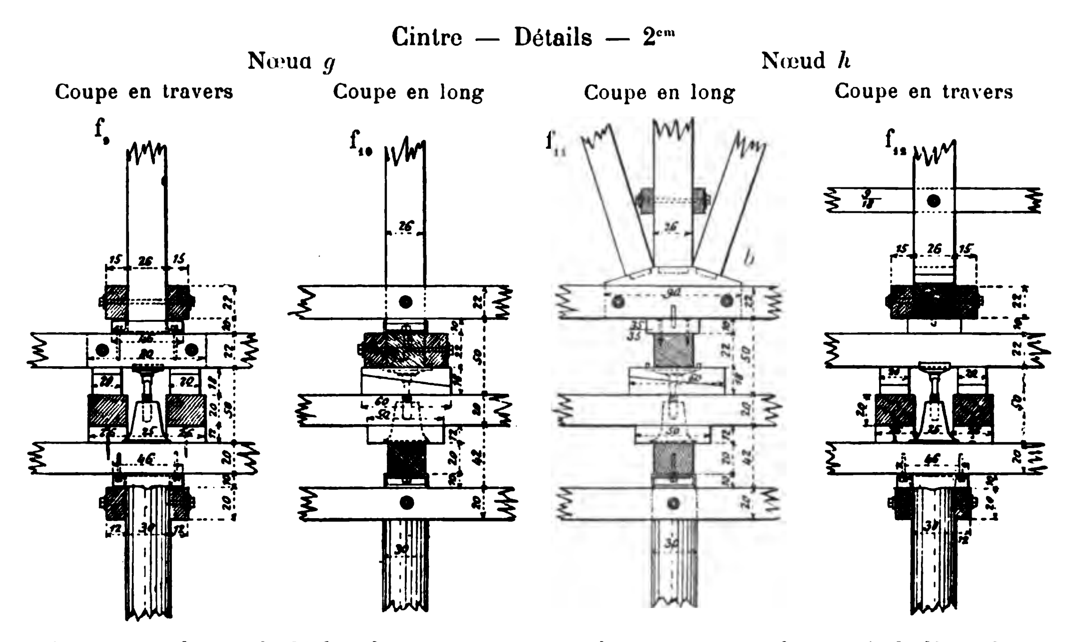
On a employé 430 tonnes de ciment.

Le sable et le gravier, très argileux, étaient soigneusement lavés.

7. Cintre (f_2, f_3). — Les pieux étaient battus de 40^{cm} à 60^{cm} dans des trous percés dans l'argile dure, au refus de 2^{mm} d'un mouton de 680^{k} tombant de $1^{m}80$.

Aux nœuds *h* (f_2, f_{11}, f_{12}), les pièces s'appuyaient sur une semelle en bois dur *b*.

Cintre — Détails — 2^{cm}



Aux nœuds *g* (f_2, f_9, f_{10}), les montants étaient armés à leur pied d'un fer ⊔.

On admettait comme résistance du bois, normalement aux fibres :

10 à 12^{k} pour le bois tendre (5 fois moins que dans le sens des fibres) ;

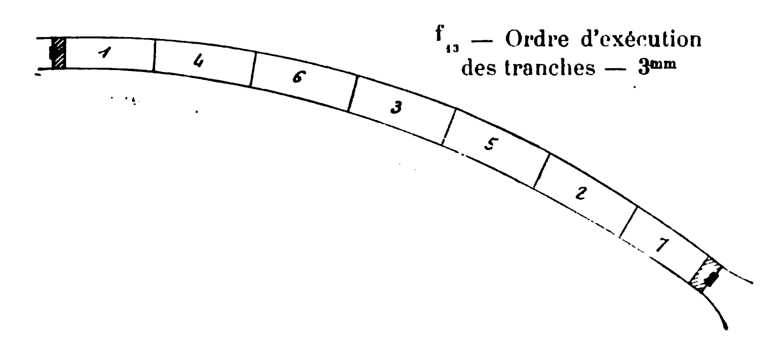
30^{k} pour le bois dur.

Pour tenir compte des secousses pendant le pilonnage, on a majoré de 50% le poids de la maçonnerie.

Les fermes reposaient sur des vérins à vis, soulagés pendant la construction par deux paires de coins (f_9 à f_{12}).

8. Fondations. — Avant la pose du béton, on enleva 1^{cm} à 2^{cm} de marne ramollie par les pluies.

9. Exécution de la grande voûte (S_4). — On l'a construite en 14 tranches symétriques de 4^{m} de largeur, dans l'ordre des chiffres de f_{13}.



f_{13} — Ordre d'exécution des tranches — 3^{mm}

10. Décintrement. — On enleva les coins, puis on abaissa les vérins à partir de la clef, sans toucher à ceux des naissances.

11. Dates.

Commencement des travaux	18 mai 1903
Construction du cintre	fin août - fin septembre
Pose des rotules	21 septembre
Bétonnage de la voûte	25 septembre - 3 octobre
Décintrement	2 - 3 novembre
Maçonneries sur les culées et la grande voûte	jusqu'à mi-décembre
Achèvement	avril 1904

12. Épreuves (15 avril 1904). — Sous la surcharge admise dans les calculs, le pont tassa, puis se releva de 4mm5.

13. Personnel.

Ingénieur. *Projet (1902) et Direction générale des Travaux :* M. Beutel, Ingénieur en chef de la Construction à la Direction Générale des Chemins de fer de l'Etat bavarois, à Munich (S_2).

Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

L'Entreprise a obtenu de substituer des tympans évidés aux tympans pleins prévus.

SOURCES :

S_1. — Deutsche Bauzeitung, 1904 : 3 septembre, p. 441 à 443 ; - 10 septembre, p. 453 et 454 : « *Eisenbahnbrücke in Stampfbeton über die Iller bei Lautrach (Bayr.-Schwaben),* - Holzminden, 24 juillet 1904. L.

S_2. — Dessins de détail que m'a très aimablement remis, à Munich, M. l'Ingénieur en chef Beutel.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

S_4. — Renseignements gracieusement communiqués par M. B. Liebold en juillet 1910.

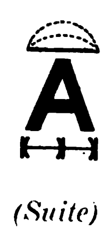
Texte : Ce qui n'est pas spécifié S_3 et S_4 est de S_1.
Dessins : Ils sont réduits de S_2 et rectifiés d'après S_1 pour les modifications en cours d'exécution.

Ce pont a été décrit dans le Génie Civil du 16 février 1907, p. 257 à 260, Pl. XVI : « *Ponts en béton à 3 rotules, sur l'Iller, à Lautrach et à Kempten (Bavière)* » A, C.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

 [1]

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS ROUTE

Série A n r te (⩾ 40m) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Malling** *Lorraine allemande* 1899-1901 $\hat{A}^n r^{te} (\geqslant 40^m)^1$ *3 voûtes de 40m*	*138m* » »	6m 00 *5m 72* Pas de fruit 0m 36	Arc d'anse de panier 40m,00 *4m 67* $\frac{1}{8,56}$ = 0,116 Entre axes des rotules : 40m,50 *4m 73* $\frac{1}{8,56}$ = 0,116	0m,88 *Corps* *1m 34* *Têtes* *1m 10* 1m 00	Béton Ciment Portland 1v Sable de la Moselle 2v Quartz cassé fin 2v	Béton (dans la voûte / près des rotules) Ciment 1v / 1v Sable 3v / 3v Pierre cassée 6v / 4v5		1° Pas d'évidements 2° »
de **Hochberg** *Wurtemberg* 1901-1903 $\hat{A}^n r^{te} (\geqslant 40^m)^2$ *2 voûtes de 39m 40*	*101m 32* *jusqu'aux abouts des culées* 50mm 50mm 13m46	5m 82 *5m 10* Fruit : 1/10 0m65	Entre axes des rotules : 40m,00 *5m 40* $\frac{1}{7,407}$ = 0,135 Entre appuis : 39m,40 *5m 40* $\frac{1}{7,296}$ = 0,137	0m,75 *1m 04* 0m 75	Granit	Béton (dans la voûte / près des rotules) Ciment Portland 1v / 1v Sable du Mein et du Neckar 2v5 / 2v Muschelkalk cassé 5v / 4v	Pression maxima : Clef : 28k Joints de rupture : 34k Retombées : 28k 400k/1m² et Rouleau à vapeur de 16T	1° 2 étages de voûtes transversales de 1m40, sur piles de 0m60 aveuglées, à 30cm en arrière des têtes, par un mur de 30cm 2° »
Cornélius à **Munich** *Bavière* 1902-1903 $\hat{A}^n r^{te} (\geqslant 40^m)^3$ *1 voûte de 44m en muschelkalk, et 2 voûtes de 38m50 en béton, avec têtes en muschelkalk*	*177m* Au-dessus de la voûte de 44m : 30mm 0 clef 6m50	18m 00 *18m 50* Pas de fruit 0m60	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : 44m,00 Entre axes des rotules : 41m,00 *3m 42* $\frac{1}{12}$ = 0,834 *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 55m*	0m,80 *1m 20* 0m 90	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte, appuyés sur sommiers de granit	PT [1] Muschelkalk *Ciment — 700k*	Pression maxima sous la surcharge : Clef : 36k Joints de rupture : 24k Retombées : 35k 500k/1m² et Rouleau à vapeur de 23T	1° Pas d'évidements Remplissage en gravier 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE $\hat{A}^{n}$ r^{te} (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/$\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	**DÉCINTREMENT** État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	**TASSEMENTS** DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne (Lias) et bancs de rocher » *Épuisements dans des batardeaux*	» » Vérins	6 *15cm* 1m25 »						
Rocher (Muschelkalk) fissuré à la culée rive gauche *On y a élargi le massif de fondation* » *Épuisements dans des batardeaux*	Fixe Montants et contrefiches » Vérins à vis	5 *20cm* 1m48 *100mm*	Moyenne des deux cintres : 128mc 1500k 7928f	0mc49 5k7 30f3	A pleine épaisseur par tranches de 1m de largeur	Tympans achevés *1 mois 1/2 environ* mi-novembre		Q = 2867mc Q : S_p = 4mc86 Q : W = 0mc46 — Fondations / Élévation / Ensemble D : 18510f / 150548f / 169058f D : S_p : 31f4 / 255f3 / 286f7 D : W : 3f0 / 24f4 / 27f4 D : Q : » / » / 59f0
Marne « Flinz » - 6m60 Pression avec surcharge : MAX. : 4k9 moy. : 3k7 *Fouille blindée*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	10 *24cm* 2m00 *120mm*	575mc 4500k	0mc71 5k5		Tympans construits *28 jours* 8 mai	t_c = 45mm t'_v = 22mm	PT [1] = 1915mc B [1] = 9345mc Q = 11260mc Q : S_p = 4mc12 Q : W = 0mc59 — Fondations / Élévation / Ensemble D : 290337f / 513770f / 804107f D : S_p : 106f1 / 187f8 / 293f9 D : W : 15f3 / 27f1 / 42f5 D : Q : » / » / 71f4

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	PROJET ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	Largeurs (entre parapets / *entre tympans* *sous la plinthe*) Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons* 4	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées 5	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en $kg/\overline{0^{m}01}^{2}$ Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Malling** *Lorraine allemande* 1899-1901 A^{n} r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)[1] *3 voûtes de 40^{m}*	*138^{m}* » »	$6^{m}00$ *$5^{m}72$* Pas de fruit $0^{m}36$	Arc d'anse de panier $40^{m},00$ *$4^{m}67$* $\frac{1}{8,56} = 0,116$ Entre axes des rotules : $40^{m},50$ *$4^{m}73$* $\frac{1}{8,56} = 0,116$	$0^{m},88$ *Corps* *$1^{m}34$* *Têtes* *$1^{m}10$* $1^{m}00$	Béton Ciment Portland 1^{v} Sable de la Moselle 2^{v} Quartz cassé fin 2^{v}	Béton (dans la voûte / près des rotules) Ciment : 1^{v} / 1^{v} Sable : 3^{v} / 3^{v} Pierre cassée : 6^{v} / $4^{v}5$		1° Pas d'évidements 2° »
de **Hochberg** *Wurtemberg* 1901-1903 A^{n} r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)[2] *2 voûtes de $39^{m}40$*	*$101^{m}32$* *jusqu'aux abouts des culées* 50^{mm} 50^{mm} $13^{m}46$	$5^{m}82$ *$5^{m}10$* Fruit : 1/10 $0^{m}65$	Entre axes des rotules : $40^{m},00$ *$5^{m}40$* $\frac{1}{7,407} = 0,135$ Entre appuis : $39^{m},40$ *$5^{m}40$* $\frac{1}{7,296} = 0,137$	$0^{m},75$ *$1^{m}04$* $0^{m}75$	Granit	Béton (dans la voûte / près des rotules) Ciment Portland : 1^{v} / 1^{v} Sable du Mein et du Neckar : $2^{v}5$ / 2^{v} Muschelkalk cassé : 5^{v} / 4^{v}	Pression maxima : Clef : 28^{k} Joints de rupture : 34^{k} Retombées : 28^{k} $400^{k}/1^{m2}$ et Rouleau à vapeur de 16^{T}	1° 2 étages de voûtes transversales de $1^{m}40$, sur piles de $0^{m}60$ aveuglées, à 30^{cm} en arrière des têtes, par un mur de 30^{cm} 2° »
Cornélius à **Munich** *Bavière* 1902-1903 A^{n} r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)[3] *1 voûte de 44^{m} en muschelkalk, et 2 voûtes de $38^{m}50$ en béton, avec têtes en muschelkalk*	*177^{m}* Au-dessus de la voûte de 44^{m} : 30^{mm} 0 clef $6^{m}50$	$18^{m}00$ *$18^{m}50$* Pas de fruit $0^{m}60$	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : $44^{m},00$ Entre axes des rotules : $41^{m},00$ *$3^{m}42$* $\frac{1}{12} = 0,834$ *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 55^{m}*	$0^{m},80$ *$1^{m}20$* $0^{m}90$	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte, appuyés sur sommiers de granit	PT [1] Muschelkalk *Ciment — 700^{k}*	Pression maxima sous la surcharge : Clef : 36^{k} Joints de rupture : 24^{k} Retombées : 35^{k} $500^{k}/1^{m2}$ et Rouleau à vapeur de 23^{T}	1° Pas d'évidements Remplissage en gravier 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE $\underset{\leftrightarrow}{A}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
FONDATIONS	GRANDES VOÛTES							
	CINTRES				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne (Lias) et bancs de rocher » *Épuisements dans des batardeaux*	» » Vérins	6 *15cm* 1m25 » »						
Rocher (Muschelkalk) fissuré à la culée rive gauche *On y a élargi le massif de fondation* » *Épuisements dans des batardeaux*	Fixe Montants et contrefiches » Vérins à vis	5 *20cm* 1m48 *100mm*	Moyenne des deux cintres : 128mc 1500k 7928f	 0mc49 5k7 30f3	A pleine épaisseur par tranches de 1m de largeur	Tympans achevés *1 mois 1/2 environ* mi-novembre		Q = 2867mc Q : S_p = 4mc86 Q : W = 0mc46 (Fondations / Élévation / Ensemble) D : 18510f / 150548f / 169058f D : S_p : 31f4 / 255f3 / 286f7 D : W : 3f0 / 24f4 / 27f4 D : Q : » / » / 59f0
Marne « Flinz » - 6m60 Pression avec surcharge : MAX. : 4k9 moy. : 3k7 *Fouille blindée*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	10 *24cm* 2m00 *120mm*	575mc 4500k	0mc71 5k5		Tympans construits *28 jours* 8 mai	t_c = 45mm t'_v = 22mm	PT [1] = 1915mc B [1] = 9345mc Q = 11260mc Q : S_p = 4mc12 Q : W = 0mc59 (Fondations / Élévation / Ensemble) D : 290337f / 513770f / 804107f D : S_p : 106f1 / 187f8 / 293f9 D : W : 15f3 / 27f1 / 42f5 D : Q : » / » / 71f4

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES — INTRADOS { Portée / *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES { Clef / *Joints de rupture* / Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Reichenbach** à **Munich** *Bavière* 1902–1903 $\hat{A}^{n}$ r^{te} (⩾ 40m)4 *A partir de la rive gauche : 4 voûtes, de 44m, 28m, 27m, 26m, ces 3 dernières articulées sur plomb*	*146m50* Au-dessus de la grande voûte : 10mm / 20mm clef 7m50	{ 20m00 / *20m50* Pas de fruit »	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : 44m00 Entre axes des rotules : { 41m00 *4m 10* $\frac{1}{10}$ = 0,10 *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 60m*	{ 0m80 *1m20* 0m90	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte, appuyés sur sommiers en granit	Bandeaux : PT [1] Muschelkalk de Franconie (500k à 800k) *Ciment — 0mc500* Corps : B [1] Ciment... 1v Sable.... 2v5 Gravier.. 5v	Pression maxima : Clef : 27k Joints de rupture : 25k Retombées : 26k	1° Entre tympans pleins, voûtes d'arête en béton sur piliers en béton 2° »
de **Neckargartach** *Wurtemberg* 1903–1905 $\hat{A}^{n}$ r^{te} (⩾ 40m)5 *5 voûtes de 40m*	*228m35* Dos d'âne Déclivité maxima : 11mm1 11m	{ 10m80 / *10m40* Fruit : 1/40 0m48 au-dessus de la chape	Arc d'anse de panier 40m00 *Voûtes de rive :* *4m375* *Voûtes interméd. :* *4m825 à 5m155* $\frac{1}{9,14}$ = 0,109 à $\frac{1}{7,75}$ = 0,129 *Rayons : Clef : 40m Retombées : 42m*	{ 0m75 *1m00 environ* 0m80	Granit des Fichtelgebirge	Béton Ciment Portland de Lauffen 1v Sable du Mein.... 1v } 2v5 porphyrique 1v5 } Porphyre Gravier...... 1v5 } 4v5 Pierre cassée 3v } Près des articulations : 1v — 2v5 — 1v5 Pas de porphyre cassé	Pression maxima dans la voûte : 38k 400k/1m² et Rouleau à vapeur de 16T	1° 10 voûtes transversales vues, en plein cintre, sur piles de 60cm percées de 5 ouvertures de 1m30 2° »
Maximilien à **Munich** *Bavière* 1903–1905 $\hat{A}^{n}$ r^{te} (⩾ 40m)6 *2 voûtes de 45m87*	*123m24* 17mm5 RD / RG 11m	{ 22m00 / *21m80* Pas de fruit 0m50	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : 45m87 Entre axes des rotules : { 44m00 *4m 90 (moy.)* $\frac{1}{8,979}$ = 0,111 *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 60m*	{ 0m80 *1m09* 1m175	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte, appuyés sur sommiers en granit	PT [1] Muschelkalk de Franconie (500k à 800k)	Pressions (MAX. / MOY.) sans surcharge : Clef 28k / » Joints de rupt. 19k / » Retombées 25k / » avec surcharge : Clef 36k / 32k Joints de rupt. 36k / 24k Retombées 32k / 28k 500k/1m² et Rouleau à vapeur de 20T	1° 8 voûtes transversales vues, en arc de 2m10 à 2m65, sur piles de 0m90 percées de 8 voûtes longitudinales en arc de 1m70 espacées de 0m80 Voûtes extrêmes d'élégissement armées. Tout en béton sauf les têtes 2° *Statue de Pallas au-dessus de la pile*

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

SÉRIE $\hat{A}^{n}\ r^{te}$ (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg / $\overline{0^{m}01^{2}}$ *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne dure « Flinz » *Résistance : 15k à 20k* – $7^{m}20$ – $5^{m}80$ Pression maxima : $5^{k}5$ *Épuisements dans des batardeaux* *Béton pilonné par couches de 10c à 15c*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis Coins aux retombées	11 *25^{cm}* $2^{m}00$ *100^{mm}*	635^{mc} 5200^{k}	$0^{mc}70$ $5^{k}8$	A pleine épaisseur, par tranches de $1^{m}20$ à $1^{m}50$ entre cloisons normales à la fibre moyenne, bétonnées de 2 en 2 symétriquement, par couches de 10 à 15^{cm}	Tympans construits Plate-forme commencée *45 jours* 12 mai	(mm): amt / avt pendant le bétonnage: 38 / 35 après: 10 / 12 t_c: 48 / 47 t'_v: 21 / 18 t''_v: 23 / 24 Culée rive gauche ← $1^{mm}3$ ↓ $0^{mm}5$ Pile-culée rive droite → 2^{mm} Elle se redressa ensuite	PT [1] = 1482^{mc} B [1] = 11080^{mc} Q = 13471^{mc} Q : S_p = $4^{mc}59$ Q : W = $0^{mc}66$ Fondations / Élévation / Ensemble D: 117421^{f} / 698409^{f} / 815830^{f} D : S_p: $40^{f}1$ / $238^{f}3$ / $278^{f}4$ D : W: $5^{f}8$ / $34^{f}2$ / $40^{f}0$ D : Q: » / » / $60^{f}6$
Rocher Pression maxima : 7^{k} *Épuisements dans des batardeaux et des fouilles blindées*	Voûte rive gauche : Retroussé sur $10^{m}70$ Passe marinière de 9^{m} Autres voûtes : Fixe Montants et contrefiches » Vérins	8 *20^{cm}* $1^{m}60$ *Clef : 100^{mm}* *Retombées : 10^{mm}*			A pleine épaisseur en 32 tranches de $1^{m}18$	Piles des voûtes d'évidement achevées *28 jours* 10 novembre	$t_c = 80^{mm}$ $t'_v = 13^{mm}$ (moyenne)	Fondations / Élévation / Ensemble PT [1]: » / 928^{mc} / 928^{mc} B [1]: 3000^{mc} / 5720^{mc} / 8720^{mc} Q: 3000^{mc} / 6648^{mc} / 9648^{mc} Q : S_p: $1^{mc}21$ / $2^{mc}69$ / $3^{mc}90$ Q : W: $0^{mc}11$ / $0^{mc}25$ / $0^{mc}36$ D: 98720^{f} / 320840^{f} / 419560^{f} D : S_p: $40^{f}0$ / $130^{f}1$ / $170^{f}1$ D : W: $3^{f}7$ / $11^{f}9$ / $15^{f}6$ D : Q: $32^{f}9$ / $48^{f}3$ / $43^{f}5$
Marne dure « Flinz » – 5^{m} Pression maxima : $5^{k}5$ *Épuisements en fouilles blindées*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	12 *24^{cm}* $2^{m}00$ *120^{mm}*	750^{mc} 6000^{k}	$0^{mc}72$ $5^{k}7$		Tympans construits *50 jours* 13 juin	$t'_v = 20^{mm}$	PT [1] = 2790^{mc} B [1] = 8354^{mc} Q = 11144^{mc} Q : S_p = $4^{mc}11$ Q : W = $0^{mc}37$ Fondations / Élévation / Ensemble D: 214839^{f} / 954993^{f} / 1169832^{f} D : S_p: $79^{f}2$ / $352^{f}3$ / $431^{f}5$ D : W: $7^{f}2$ / $31^{f}8$ / $39^{f}0$ D : Q: » / » / $105^{f}0$

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE Largeurs (entre parapets / *entre tympans sous la plinthe*) Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATIONS DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Wittelsbach** à **Munich** *Bavière* 1904-1905 Â n rte (⩾ 40m)7 *A partir de la rive gauche : 4 voûtes de 44m, 28m, 27m, 26m, les 3 dernières articulées sur plomb*	*152m* Au-dessus de la grande voûte: 20mm 25mm clef 8m	20m00 *20m30* Pas de fruit 0m37	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : 44m,00 Entre axes des rotules : 41m,00 *4m,10* $\frac{1}{10}$ = 0,10 *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 60m*	0m,80 *1m20* 0m90	Rotules d'acier moulé prises dans des sabots en fonte appuyés sur sommier de granit	Bandeaux : PT[1] Muschelkalk (500k à 800k) Corps : B[1] 1v — 2v5 — 5v	Pressions (MAX. / moy.) sans surcharge : Clef 25k / » Joints derupt. 17k / » Retombées 25k / » avec surcharge : Clef 29k / 27k Joints derupt. 25k / 19k Retombées 28k / 26k 500k/1m² et Rouleau à vapeur de 20T	1° Entre tympans pleins, voûtes en béton de 1m en long. 1m50 en travers, sur piliers en béton de 50c×50c 2° *Statue équestre sur la pile culée*
de **Moulins-lez-Metz** *Lorraine allemande* 1904-1905 Â n rte (⩾ 40m)8 *3 voûtes de 40m, 44m, 40m*	*158m50* 30mm 30mm 9m80	7m00 *7m10* Pas de fruit 0m45	Arcs d'anse de panier *Voûte centrale* Entre appuis : 44m,00 *5m68* $\frac{1}{7,746}$ = 0,129 *Rayons : Clef : 44m60 Retombées: 44m* Entre axes des rotules : 44m,70 *5m59* $\frac{1}{7,996}$ = 0,125 *Voûtes de rive* Entre appuis : 40m,00 *4m,78* $\frac{1}{8,368}$ = 0,120 *Rayons : Clef : 48m Retombées: 48m* Entre axes des rotules : 40m,54 *4m,79* $\frac{1}{8,463}$ = 0,118	0m,95 *Corps : 1m,42* *Têtes : 1m19* 1m15 0m,90 *Corps : 1m,38* *Têtes : 1m12* 1m05	Béton moulé Ciment Portland de Dyckdorf 1v Sable de la Moselle 2v Dolomite cassée fine de Perl 2v	Bandeaux : MEV[1] Bossages Calcaire de Gravelotte et d'Amanvilliers *Ciment — 0mc333* Corps : B[1] Ciment..... 1v Sable...... 2v5 Gravier.... 5v Près des articulations : Ciment..... 1v Sable...... 2v Gravier.... 4v	Pressions (MAX. / moy.) *Voûte centrale :* sans surcharge : Clef 22k / » Joints derupt. 20k / 19k Retombées 21k / » avec surcharge : Clef 25k / » Joints derupt. 31k / 15k Retombées 24k / » *Voûtes de rive :* sans surcharge : Clef 21k / » Joints derupt. 20k / 14k Retombées 21k / » avec surcharge : Clef 24k / » Joints derupt. 32k / 18k Retombées 24k / » 400k/1m² et Rouleau à vapeur de 16T	1° 10 voûtes transversales, en plein cintre, de 1m50, en béton Ciment.... 1v Sable..... 3v Gravier... 6v les voûtes extrêmes seules sont armées Piles de 0m[illegible] 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

SÉRIE $\hat{A}^{n}$ r[te] (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** — DÉPENSE **D**
	GRANDES VOÛTES							
	CINTRES							
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/$\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	**DÉCINTREMENT** État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	**TASSEMENTS** DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne dure « Flinz » — 5m Pression maxima : 4k1 *Épuisements en fouilles blindées*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	11 *25cm* 2m00 *120mm*	625mc 5100k »	0mc70 5k71 »	A pleine épaisseur par tranches de 1m80 à 3m	Tympans exécutés *49 jours* 30 mai	t_c = 40mm entre le clavage et le décintrement t'_v = 31mm	PT[1] = 1522mc B[1] = 12685mc Q = 14207mc Q : S_p = 4mc67 Q : W = 0mc66 D : Fondations 266001f ; Élévation 692410f ; Ensemble 958411f D : S_p : Fondations 87f5 ; Élévation 227f8 ; Ensemble 315f3 D : W : Fondations 12f4 ; Élévation 32f2 ; Ensemble 44f5 D : Q : Fondations » ; Élévation » ; Ensemble 67f5
Marne dure (Lias inférieur) » Pression maxima : ivec surcharge: 5k ans surcharge: 4k *Batardeaux endus étanches par de la toile à voile*	» » » Vérins	*Voûte centrale :* 6 *15cm* 1m40 *100mm* *Voûte rive gauche :* *Surhaussement 80mm*	» » 32084f[6]	» » 97f7	A pleine épaisseur en 22 tranches symétriques	Tympans exécutés *Voûte centrale : 50 jours* 29 juillet	t_c = 50mm[6] t'_v = 7mm[6] t''_v = 0[6] Les joints de dilatation se sont ouverts de 1mm aux retombées et fermés de 0mm5 à la clef Recul des culées : RG ← 0mm3 RD → 0mm1	Q = 5970mc Q : S_p = 5mc38 Q : W = 0mc55 D = 252106f (sans les garde-corps) D : S_p = 227f1 D : W = 24f2 D : Q = 42f2

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.
6. La source S'', ne spécifie pas à quelle voûte s'appliquent ces renseignements.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	*Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	Largeurs { entre parapets / *entre tympans* *sous la plinthe* } Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	**INTRADOS** { Portée / *Montée* / Surbaissement } *Rayons* 4	**ÉPAISSEURS** CORPS ET TÊTES { Clef / *Joints de rupture* / Retombées } 5	**ROTULES** *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.* 6	**MATÉRIAUX** *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	**PRESSIONS** en kg/0m01² Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Mannheim** *Grand-Duché de Bade* 1905-1908 Aⁿ rᵗᵉ (⩾ 40m)9 *Un arc central en acier de 114m à 2 articulations* *2 voûtes de rive en béton, de 59m50*	*242m* *entre culées* Au-dessus des voûtes de rive : 27mm 14m35 du sommet de l'arc central au niveau moyen de l'eau	{ 15m00 / *15m36* } Pas de fruit 0m25	Arc d'anse de panier Entre appuis : { 59m,50 / *5m63* / $\frac{1}{10,56}$ = 0,095 } *Rayons :* *Clef : 66m* *Retombées : 74m42* Entre axes des rotules : { 58m,50 / *5m52* / $\frac{1}{10,60}$ = 0,094 }	{ 1m,07 / *1m,47* / 1m12 }	Rotules en acier moulé appuyées sur sommiers de granit	Bandeaux : PT [1] Grès rouge du Palatinat, écaillé aux têtes, plat en douelle Corps : B [1] Ciment........ 1v Sable......... 4v Pierre cassée.. 3v (Porphyre)	Pressions sous la surcharge : MAX. / moy. Clef 37k / 27k Joints de rupture 34k / 31k Retombées 35k / 31k 400k/1m² et 2 rouleaux à vapeur de 25T	1° Entre tympans pleins, plate-forme en béton armé de 22cm sur piliers en béton armé, contreventés par des cornières 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE $\hat{A}^{n}$ r^{te} (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4].
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/$\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	**DÉCINTREMENT** État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	**TASSEMENTS** DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Gravier Voûte RG Pile — 5m *Air comprimé* Culée *Pilotis et béton posé à sec* Voûte RD Pile *Béton, partie à sec, partie immergé* Culée *Sable fin, argile, puis gravier* » *Batardeau en fer*	» » » Vérins	13 *18cm* 1m 23 *Voûte* *RG : 105mm* *RD : 120mm*			Par tranches	» » 25 octobre	t_c = 4mm t'_v = RG 150mm RD 224mm	D = 1 925 040f (Arc métallique et voûtes en béton)

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES   ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE A^n r^{te} ($\geqslant$ 40m)

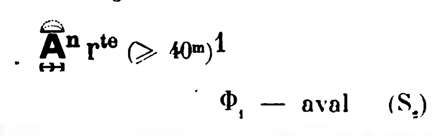
MONOGRAPHIES

PONT SUR LA MOSELLE, PRÈS DE MALLING[1]

(LORRAINE ALLEMANDE, - Cercle de Thionville)

Route de Fixem à Oberrentgen

1899-1901



A^n r^{te} ($\geqslant$ 40m)1

Φ_1 — aval (S_2)



1. Aspect (S_2). — Il semble qu'il y ait un angle aux sommets des voûtes. Les clefs, en béton plus gras, sont plus foncées. On distingue les tranches de construction par leurs différentes teintes. Elles paraissent avoir été pilonnées parallèlement à la douelle.

1. — en allemand « *Mallingen* ». - station du chemin de fer de Thionville à Trèves, à 12k5 de Thionville.

On voit, en douelle, les empreintes des planches du cintre.

Les becs des piles coupent durement les retombées des voûtes ; ils portent des pilastres en pierre de taille de grès.

Les tympans sont en moellons équarris à taille plate ; les joints de dilatation sont cachés.

La plinthe est en encorbellement sur consoles de grès rouge.

2. Personnel (S_1).

Projet et Direction des Travaux : Service de la Construction des Routes d'Alsace-Lorraine (Wegebauverwaltung in Elsass-Lothringen).

M. Blumhardt « Regierungs-und Baurat » à Strasbourg.

Entrepreneurs : MM. Windschild et Langelott, de Cossebaude, près de Dresde.

•

SOURCES :

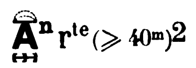
S_1. — Renseignements gracieusement communiqués par M. Blumhardt, à Strasbourg.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1909.

PONT SUR LE NECKAR, A **HOCHBERG** *(WURTEMBERG)*

Route d'Ossweil à Hochberg

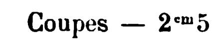
1901-1903



Φ. (S''')



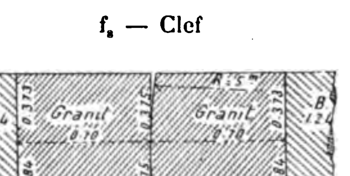
1. Rotules (S'.).



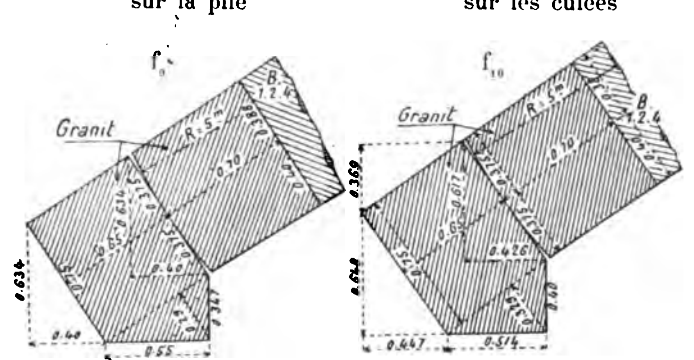
Retombées

sur la pile — sur les culées

f_8 — Clef



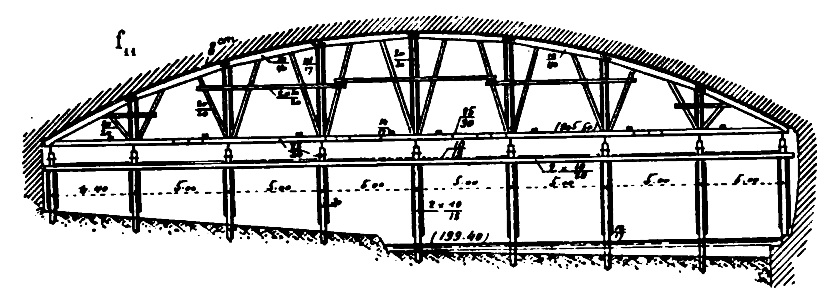
f_9 — f_{10}



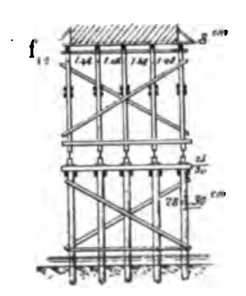
2. Cintres (S'.).

2mm5

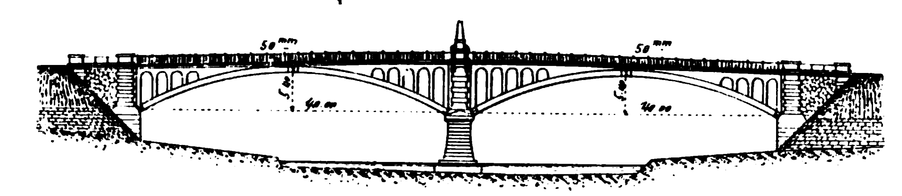
f_{11}



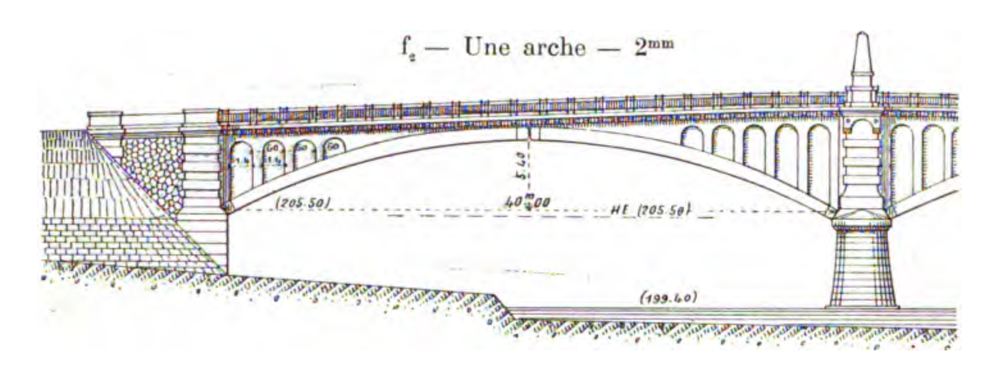
f_{12}



f_1 — Ensemble — 1^{mm}



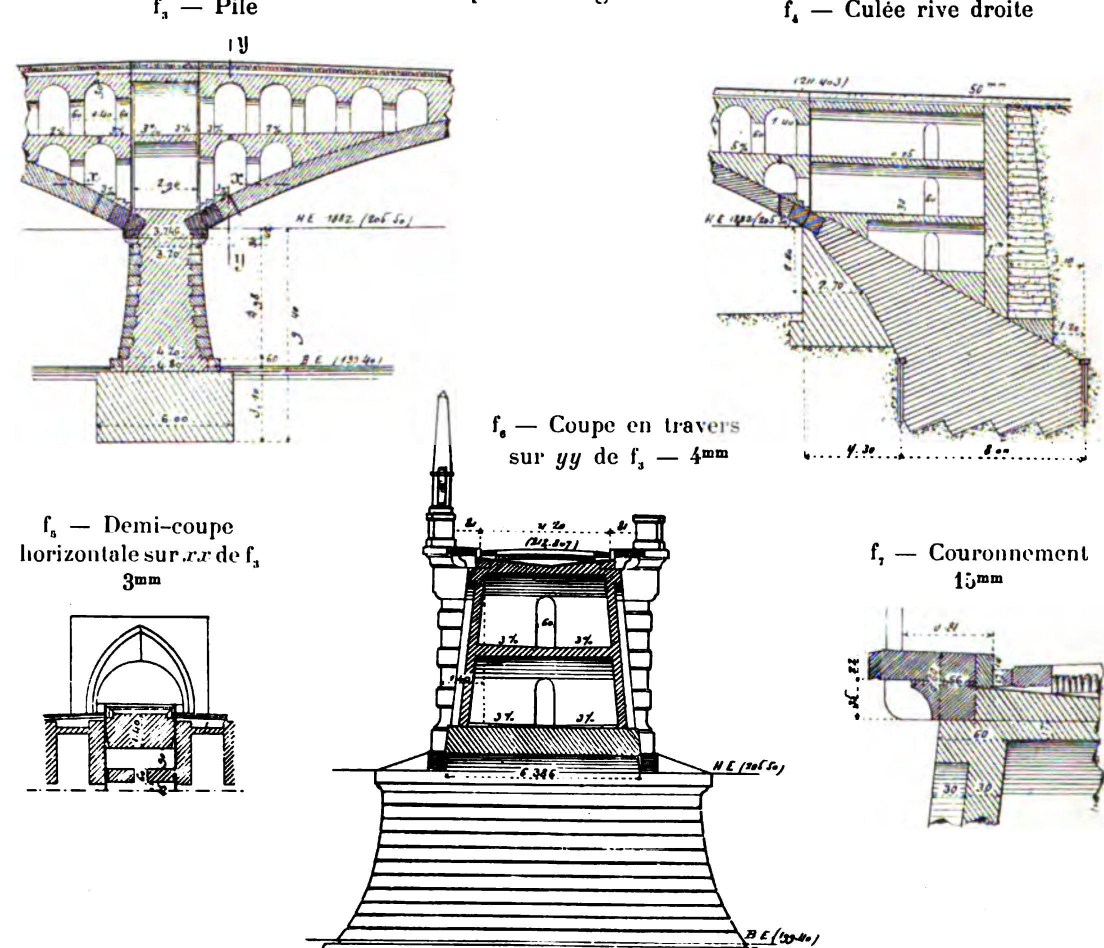
f_2 — Une arche — 2^{mm}



Coupes en long — 3^{mm}

f_3 — Pile

f_4 — Culée rive droite



f_6 — Coupe en travers sur yy de f_3 — 4^{mm}

f_5 — Demi-coupe horizontale sur xx de f_3 3^{mm}

f_7 — Couronnement 15^{mm}

3. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	octobre 1901
Piles et culées	15 nov. 1901 - juin 1902
Cintres et voûtes	fin juin - fin septembre
Décintrement	mi-novembre
Ouverture à la circulation	6 avril 1903

4. Personnel (S'_1).

Ingénieurs : *Projet et Direction des Travaux :* M. von Schaal, « Oberbaurat » ; M. Kübler, « Strassenbauinspektor ».

Entrepreneurs : MM. Sahlender et Heinze, de Gotha.

SOURCE :

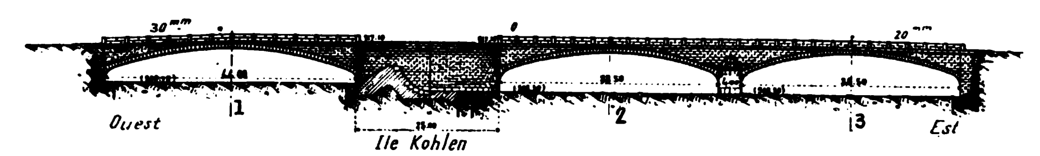
S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), renseignements (S''_1), et photographie (S'''_1) qu'a bien voulu communiquer, sur la gracieuse intervention de M. le Dr Weyrauch, Professeur à l'Ecole Polytechnique de Stuttgart, M. Richard Leibbrand « Vorstand der Ministerialabtheilung für den Strassen-und Wasserbau » à Stuttgart.

PONT CORNÉLIUS, SUR L'ISAR, A MUNICH *(BAVIÈRE)*

entre la Corneliusstrasse et la Schweigerstrasse

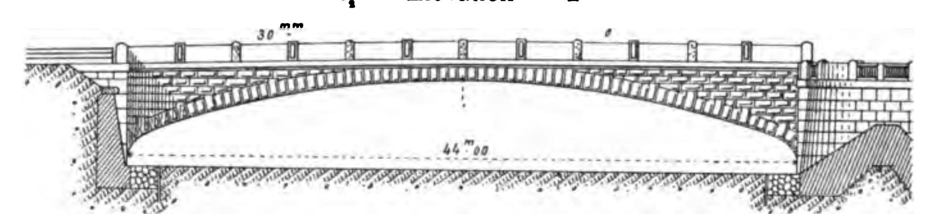
1902-1903 

f_1 — Ensemble amont — $0^{mm}75$

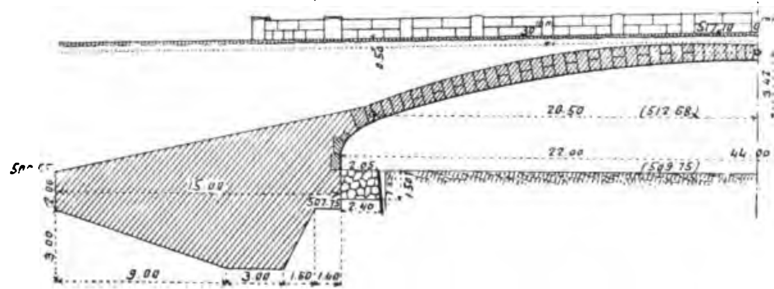


Voûte 1

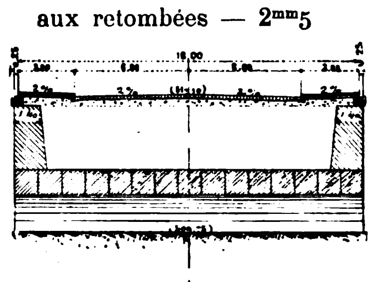
f_2 — Élévation — 2^{mm}



f_3 — Demi-coupe en long — $2^{mm}5$

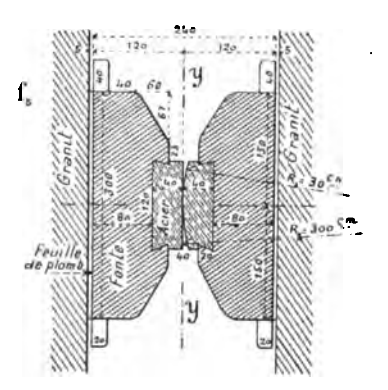


f_4 — Coupe en travers aux retombées — $2^{mm}5$

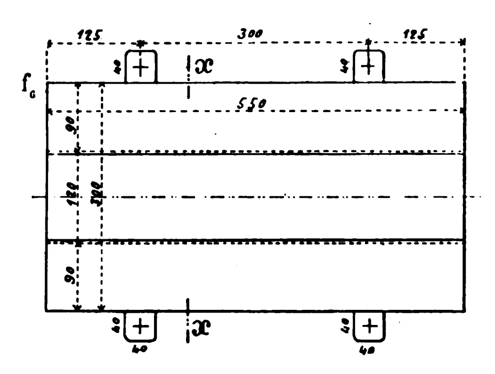


Rotules — 10^{cm}

Coupe sur xx de f_6



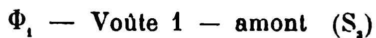
Vue sur yy de f_5



1. Aspect.

1. Aspect. — Sur ces minces voûtes, les tympans en gros appareil sont un peu lourds.

Des figures sculptées du parapet, j'aime mieux ne rien dire.

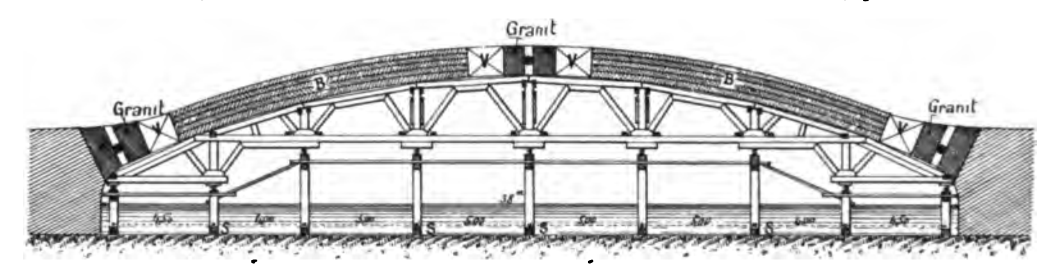

Φ_1 — Voûte 1 — amont (S_3)



2. Accident à la voûte 3 (f_7) (26 août 1902) (S_2).

A. - Description du cintre. — Les cintres des voûtes 2 et 3 étaient en pièces de sapin fort trouées, provenant de démolitions. Les palées portaient sur des semelles transversales *s* (f_7) en sapin de même provenance, posées sur une plate-forme en béton. Elles étaient très légèrement contreventées en long.

f_7 — Voûte 3 — Cintre et Mode d'exécution — 3mm (S_2)



B. - Construction de la voûte. — On posait d'abord les sommiers des articulations et les bandeaux ; puis on pilonnait le béton, non, comme d'usage, par tranches isolées, mais par couches superposées[1] de 15cm à 20cm, ce qui trouble le béton dans sa prise. On avait ménagé des vides V (f_7) de 60cm derrière les sommiers des articulations.

1. — « en peaux d'oignon » *(nach der Methode der Zwiebelschalen).*

C. - Accident. — Le 26 août 1902, le cintre, chargé des sommiers d'articulation, des bandeaux, et de 650^{mc} de béton posé dans les 30 dernières heures, s'écroula, tuant 2 hommes et en blessant 35.

Etaient intacts les vérins et les plates-formes en béton sous les semelles.

Ces semelles étaient écrasées. Quelques Ingénieurs y ont vu la cause de l'accident.

3. Personnel (S''_1).

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.
Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville
Architecture : M. le Professeur von Thiersch (S_3).

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1), qu'ont bien voulu me remettre MM. Sager et Wœrner.

S_2. — Beton und Eisen, 5 Heft 1903, p. 305 à 311 : « *Die Corneliusbrücke und der* « *Einsturz eines Bogens derselben am 26 August 1902* » Dpl. Ing. W. Binswanger.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

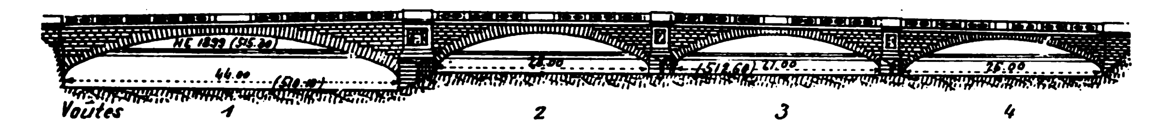
PONT DE REICHENBACH, SUR L'ISAR, A MUNICH *(BAVIÈRE)*

en prolongement de la Frauenhoferstrasse

1902–1903

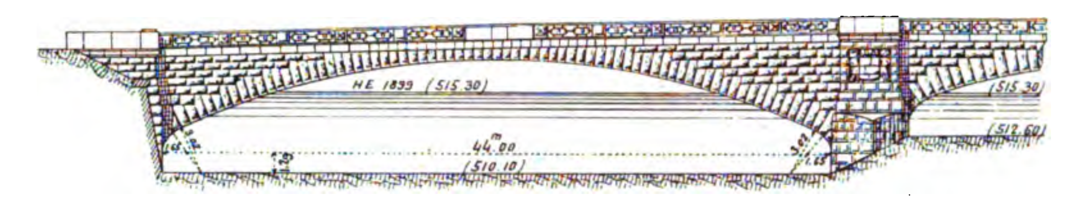
A^n r^te (⩾ 40^m)4

f_1 — Ensemble, amont — 1^mm

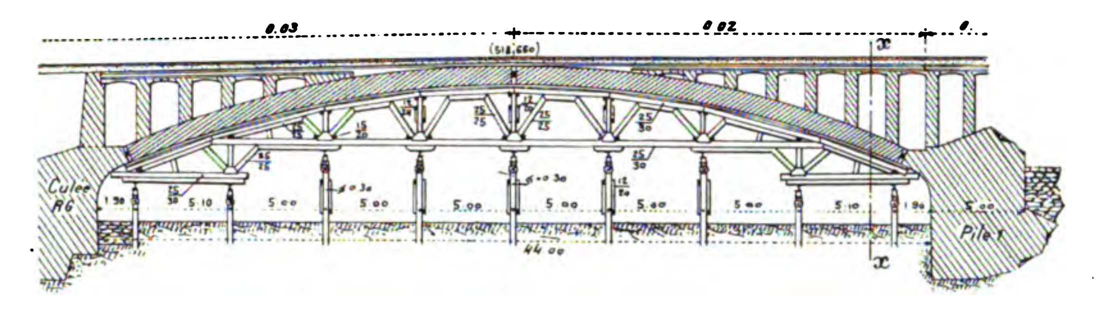


Voûte 1

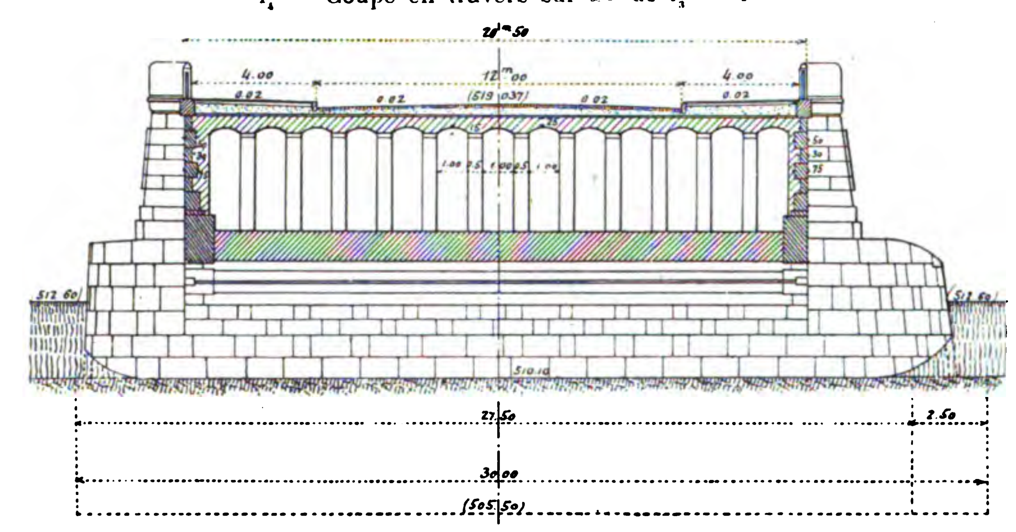
f_2 — Élévation amont — 2^mm



f_3 — Coupe en long et cintre — 2^mm5



f_4 — Coupe en travers sur xx de f_3 — 4^mm



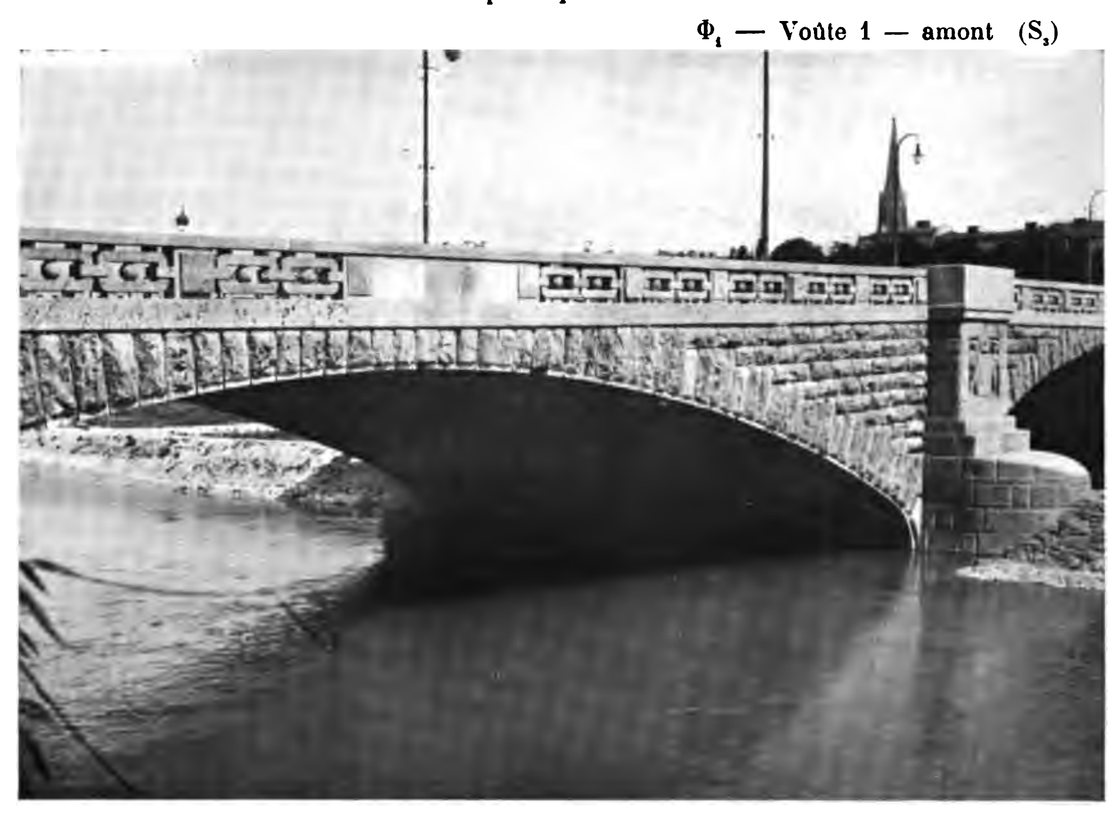
1. Voûte 1 (f_1 à f_4).

A. - Tracé. — La fibre moyenne est la courbe de pression sous le poids propre.

Les épaisseurs de la voûte sont telles que la pression y est à peu près uniforme (25 à 30^k).

B. - Rotules. — Les mêmes qu'au pont Cornélius [1].

Φ_1 — Voûte 1 — amont (S_3)



2. Voûtes 2, 3, 4. — Leurs charnières sont de simples bandes de plomb de $200^{mm} \times 5^{mm}$ entre deux voussoirs de granit ; elles sont masquées aux têtes.

3. Tympans. — Les tympans en pierre de taille à gros bossages écrasent la voûte (Φ_1).

Entre eux, de minces piliers de béton soutiennent une plate-forme en béton chapée d'asphalte, qui porte la chaussée et les trottoirs (f_4).

4. Chaussée. Trottoirs. — La chaussée est pavée en granit avec joints bourrés d'asphalte. Les trottoirs sont en asphalte.

Sur la chaussée passent des voies de tramway ; sous les trottoirs, des tuyaux.

Les mâts de l'éclairage électrique, qui portent aussi les fils pour le tramway, sont à 0^m80 de la bordure des trottoirs.

1. — $\widehat{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)^3 — (f_5, f_6), Tome IV.

5. Exécution des voûtes.

— On posa à sec, d'abord les sommiers, puis les voussoirs des bandeaux.

Ils sont plus épais aux reins que le corps en béton de la voûte : pendant qu'on les posait, on augmenta le surhaussement des fermes de tête en manœuvrant leurs vérins.

On construisit ensuite le corps en béton, par tranches isolées.

Après la prise du béton, on enlevait les cloisons ; on piquait grossièrement les lits pour augmenter l'adhérence avec le nouveau béton ; puis on les recouvrait d'une mince couche de mortier de ciment. On pilonnait ensuite dans le vide entre les tranches.

Pendant qu'on bétonnait une tranche, on matait au mortier à $1^v/2^v$ les voussoirs de ses bandeaux.

Les rotules avaient été posées en même temps que leurs sommiers. Mais on ne les fixa à leur place que lorsqu'on eut chargé le cintre du poids total des matériaux.

6. Dates de construction (1903) et tassements au décintrement.

Numéro des voûtes	Portée	Bétonnage		Décintrement	Nombre de jours sur cintre	Tassement au décintrement en *mm.*
		Commencement	Fin			
1 (R. G.)	44^m	23 mars	28 mars	12 mai	45^j	20^{mm} [2]
2	28	29 janvier	6 février	15 avril	68	12
3	27	8 janvier	12 janvier	14 mars	61	6
4 (R. D.)	26	7 janvier	»	14 mars	»	10

7. Mouvements pendant le décintrement de la voûte 4 (rive droite).

— Quand on décintra la voûte 4 (rive droite), sa pile s'inclina de 1 à 2^{mm} vers l'arche 3, alors sur cintre. Elle se redressa, quand on décintra l'arche 3.

8. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville ;
M. H. Grüb, Ingénieur.

Architecture : M. le Professeur Fr. von Thiersch (S_1).

2. — Il correspond à peu près à un coefficient d'élasticité moyen : E (Kg/$\overline{0^m01}^2$) = 2×10^5 (S_2)

SOURCES :

S_1. — Renseignements qu'ont bien voulu me communiquer MM. Sager et Wœrner

S_2. — Beton und Eisen, 1904, p. 9 à 17, Pl. II : « *Münchner Brückenbauten* » ; *II.* « *Die Reichenbachbrücke in München* », E. Burk.

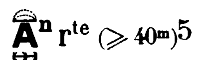
S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_1 ou S_2 est de S_3.

PONT SUR LE NECKAR, A **NECKARGARTACH**[1] *(WURTEMBERG)*

Route d'Heilbronn à Neckargartach

1903–1905



Φ (S)



1. Articulations (f_8, f_9). — On a poli à la meule les surfaces de contact (S_2).

Articulation de retombée — 1cm

f_8 — Élévation

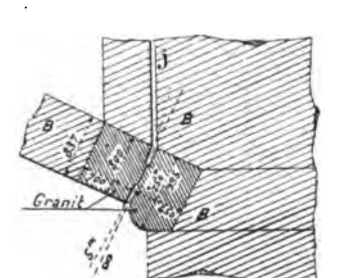
J

Béton

Granit

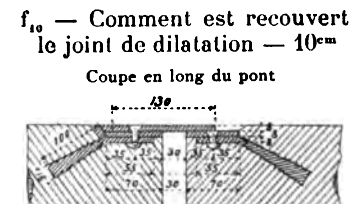
Grès

f_9 — Coupe



f_{10} — Comment est recouvert le joint de dilatation — 10cm

Coupe en long du pont

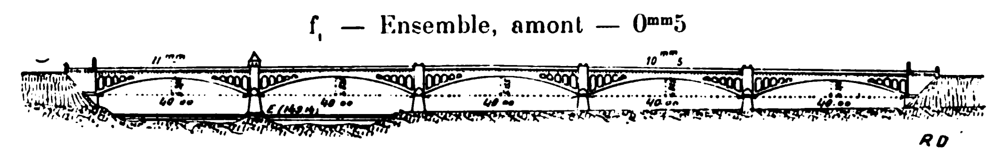


2. Joints de dilatation (f_8 à f_{10}). — Des rotules de retombées aux parapets, des joints verticaux *j* coupent les tympans le long des pilastres.

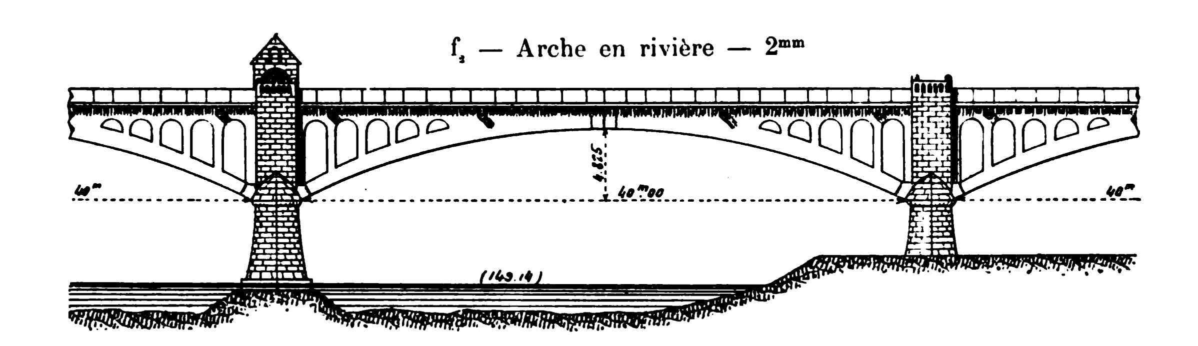
Sur la plate-forme portant la chaussée et sur les trottoirs, ils sont recouverts par des plaques de tôle glissant l'une sur l'autre (f_{10}).

1. — à 3km environ en aval d'Heilbronn (S_3).

f₁ — Ensemble, amont — 0mm5

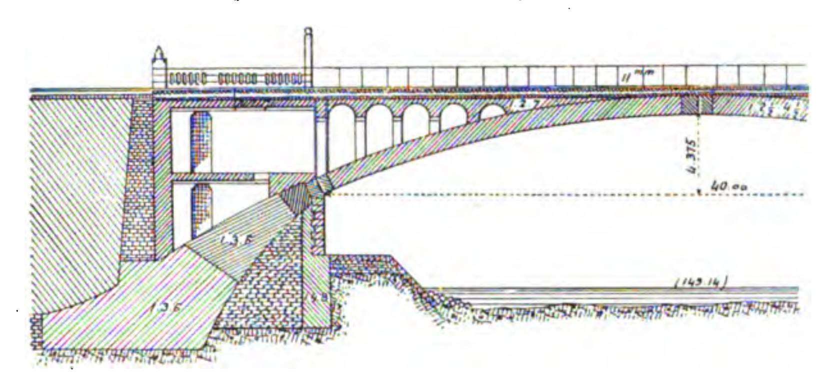


f₂ — Arche en rivière — 2mm

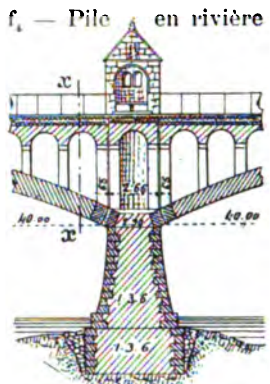


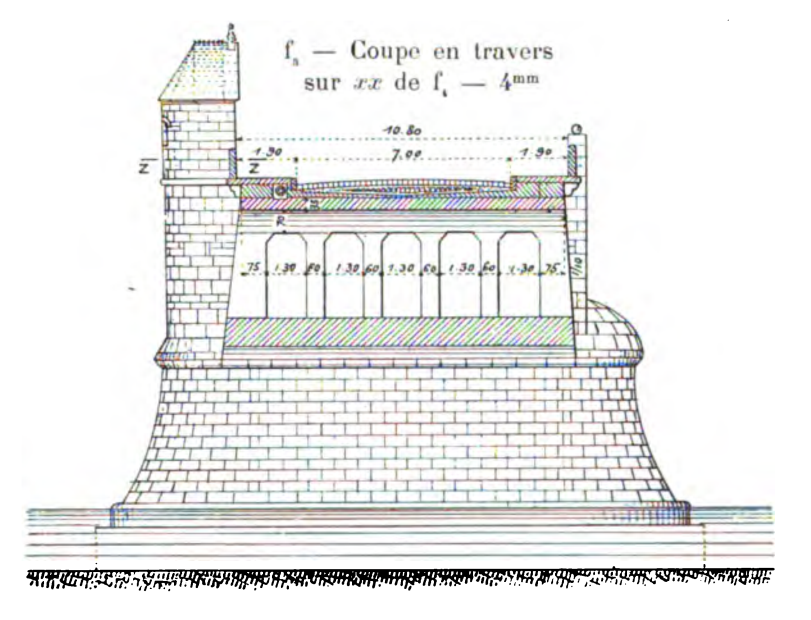
Coupes en long — 2mm5

f₃ — Demi-voûte de rive gauche



f₄ — Pile en rivière

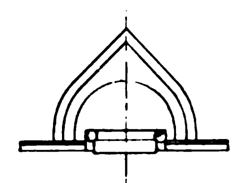




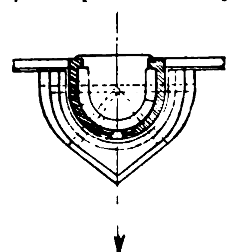
f₅ — Coupe en travers sur *xx* de f₄ — 4mm

Becs — 4mm

f₆ — Plan par-dessus



f₇ - Coupe sur *zz* de f₅



Φ_2 (S_4)

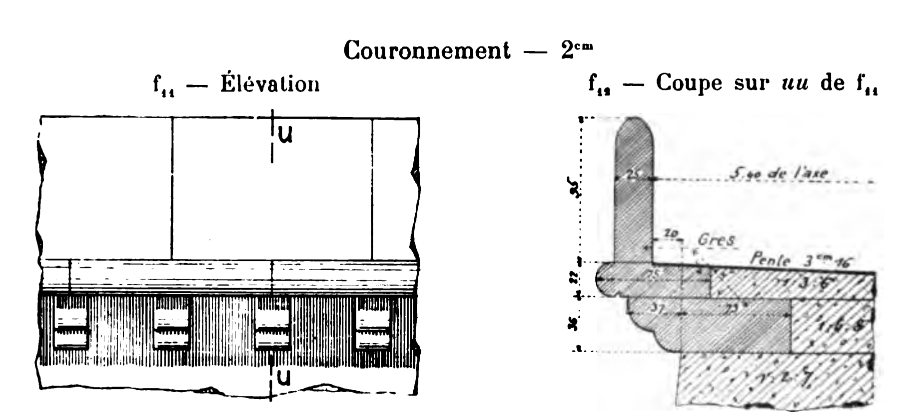


3. Chaussée et trottoirs (S_2). — Les pavés de granit de 17^{cm} reposent sur 6^{cm} de sable et gravier fin.

Les trottoirs sont en béton revêtu de ciment ; les bordures, en granit.

Couronnement — 2^{cm}

f_{11} — Élevation f_{12} — Coupe sur *uu* de f_{11}



4. Écoulement des eaux (S_2). — Sur le béton sous chaussée, en pente vers l'axe du pont, on a étalé successivement : un enduit lisse de ciment, - de l' « Anthrazin » chaud, - une couche de goudron chaud, - des feuilles de carton de toiture armé de jute, - une épaisse couche de goudron chaud.

Le tout[2] est recouvert de sable.

2. — « *Cette chape s'est jusqu'ici parfaitement comportée* » (*vorzüglich bewährt*) (S_2). Elle revient à 1'30 le m. q., sans l'enduit de ciment (S_2).

Un fer Zorès, dans l'axe du pont, conduit les eaux aux tuyaux traversant les reins des voûtes.

L'eau des rigoles s'écoule hors du pont par des gargouilles en grès (S_3) (Φ_1, f_2).

L'extrados des voûtes est recouvert de deux couches de « Siderosthen Lubrose ».

5. Matériaux (S_1, S_2, S_3).

A. - Composition du béton.

	Pour 1^{vol} de ciment Portland			Poids de ciment par mc. de béton
	Sable	Gravier — Quantité	Gravier — Grosseur	
Massifs de fondation et corps des piles et culées. — Trottoirs (sous le revêtement)........................	3^v	6^v		200^k
Voûtes [3] Résistance à 2 mois 1/2 : 400^k. On exigeait des matériaux tout-à-fait propres.	Sable du Mein 1^v Sable porphyrique (2 à 4^{mm}) 1^v5	Gravier porphyrique 1^v5 Porphyre cassé 3^v	8 à 12^{mm}	280^k
Près des articulations..........	id.	Gravier porphyrique 1^v5		
Tympans et plate-forme........	2^v	7^v	12 à 15^{mm}	250^k

B. - Maçonnerie (S_1). — Tous les massifs de fondation sont en béton : celui de la pile en rivière est parementé en moellons de calcaire.

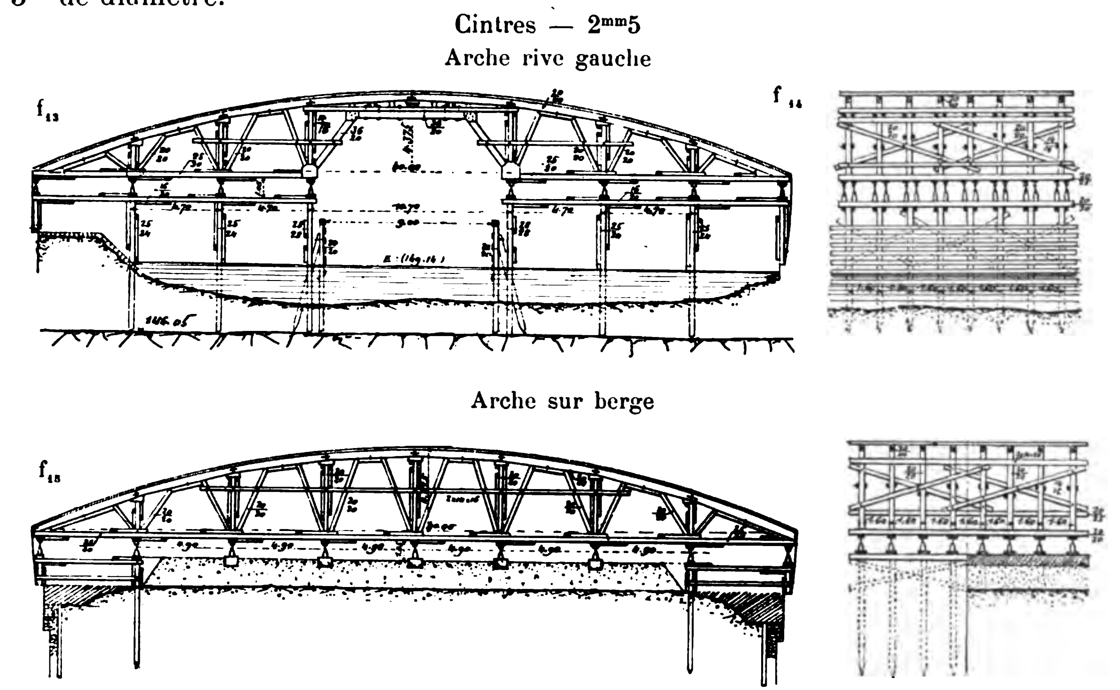
Les parements des piles et culées, les consoles, plinthes, parapets, niche, sont en grès d'Heilbronn.

6. Cintres (f_{13} à f_{16}). — On n'a pas taillé d'assemblages.

Les abouts des pièces sont maintenus par des goujons de 8^{cm} de long, de 3^{cm} de diamètre.

Cintres — 2^{mm}5

Arche rive gauche



3. — Dosage déterminé après essais à l'usine de Lauffen (S_4). Le béton de tête était plus fin, afin qu'on pût le travailler (S_2).

Les montants et contrefiches portent sur de forts ⊔ en fer, qui empêchent les déplacements latéraux et la pénétration dans les semelles.

On a ménagé sous le cintre de la voûte rive gauche une passe libre de 9^m : les chalands et radeaux y étaient guidés par un remorqueur à pétrole.

7. Fondations (S_1). — A la pile en rivière, on battit une enceinte étanche à 2^m50 de l'emplacement des maçonneries. On épuisa, et on creusa jusqu'au rocher, en laissant en haut une banquette de 1^m.

Les autres fouilles furent descendues de 6^m à 9^m sous le terrain naturel, d'abord sur 3^m en talus, puis par épuisement en fouilles blindées.

8. Exécution des voûtes (S_1). — *A. Construction par tranches.* Elles ont été faites toutes ensemble en 18 jours (S_1).

Le béton était pilonné par couches de 15^cm au plus et par tranches symétriques de 1^m18 d'épaisseur (32 par voûte). Chaque tranche, cubant 12 à 14^mc, était faite en 5 ou 6 heures.

On a occupé, en moyenne, 140 ouvriers par jour au bétonnage.

B. Pose des rotules. — Aux retombées, on posa d'abord le bloc inférieur. Entre ce bloc et la tranche inférieure de la voûte, on a ménagé la place du bloc supérieur avec un jeu de 12^cm.

On était assuré que les blocs étaient exactement en place, quand des règles graduées s'enfonçaient de la même quantité au-dessus ou au-dessous de la ligne de contact.

On bourrait de coton les joints d'articulation.

9. Construction des piles des voûtes d'évidement (S''_1).

On l'a conduite de façon que la charge sur les voûtes fût aussi uniforme que possible (S''_1).

10. Décintrement (S_1). — On l'opéra en 3 fois, après qu'on eut construit les piles des voûtes d'évidement (S''_1).

Dates	Nombre de jours après l'achèvement des voûtes	Tassement en *mm* des clefs des voûtes n^os : 1 (R G)	2	3	4	5 (R D)	Observations
1904							
15 octobre	8^j	4	4	5	4	4	On abaissa les cintres de quelques millimètres à la clef, - moins vers les retombées : les voûtes ne les quittèrent pas.
21 octobre	14^j	2	1	2	2	2	(idem)
10 novembre	28^j	7	6	1	5	7	On abaissa les cintres jusqu'au décollement complet.
	Totaux...	13	11	8	11	13	

On avait prévu un tassement de 24^mm.

Les vérins étaient manœuvrés par 80 hommes.

11. Dates (S"$_1$, S$_2$).

Fondations		10 août - 16 décembre 1903
Construction des cintres		mars 1904
Achèvement des voûtes		7 octobre
Piles et voûtes d'évidement		10 octobre - 10 novembre
Ouverture	aux piétons	15 juin 1905
	aux voitures	1er août

12. Personnel (S"$_1$, S$_2$).

Ingénieurs :

Projet et Direction des Travaux : M. von Schaal, « Oberbaurat », à Stuttgart.
Direction immédiate : M. Wegmann, « Regierungsbaumeister ».

Architecture, Décoration : M. le Professeur Theodor Fischer.
Sculpture : M. Jacob Brüllmann, de Stuttgart.

Entrepreneur : M. C. Baresel, de Stuttgart-Untertürkheim.

SOURCES :

S$_1$. — Dessins d'exécution (S'$_1$) et renseignements (S"$_1$), que m'a gracieusement communiqués M. le « Baudirektor » Richard Leibbrand, « Vorstand der Strassen-und Wasserbauabteilung », du Ministère de l'Intérieur à Stuttgart.

S$_2$. — « Bauzeitung für Württemberg, Baden, Hessen, Elsass-Lothringen », 1906 : 1er septembre, p. 275 à 278 ; — 8 septembre, p. 283 à 286 : « *Die neue Strassenbrücke bei* « *Neckargartach* », nach einem Vortrag des Erbauers, Oberbaurats. v. Schaal, im Württembergischen Verein für Baukunde.

S$_3$. — « *Strassenbrücke über den Neckar bei Neckargartach* », Stuttgart, Strecker et Schröder, 1908.
Cette monographie m'a été gracieusement adressée par M. R. Leibbrand.

S$_4$. — Ce que j'ai vu — septembre 1908.

Les dessins sont réduits de S'$_1$, sauf f$_9$ qui est de S$_2$.

PONT MAXIMILIEN, SUR LE BRAS DROIT DE L'ISAR, A MUNICH *(BAVIÈRE)*

en prolongement de la Maximilianstrasse

1903–1905 A^n r^te (⩾ 40^m)6

Φ₁ (S₁)



1. Aspect. — L'aspect d'un pont à deux arches est, d'ordinaire, fort ingrat : il est sauvé ici par la grande Pallas qui couronne et justifie la pile unique.

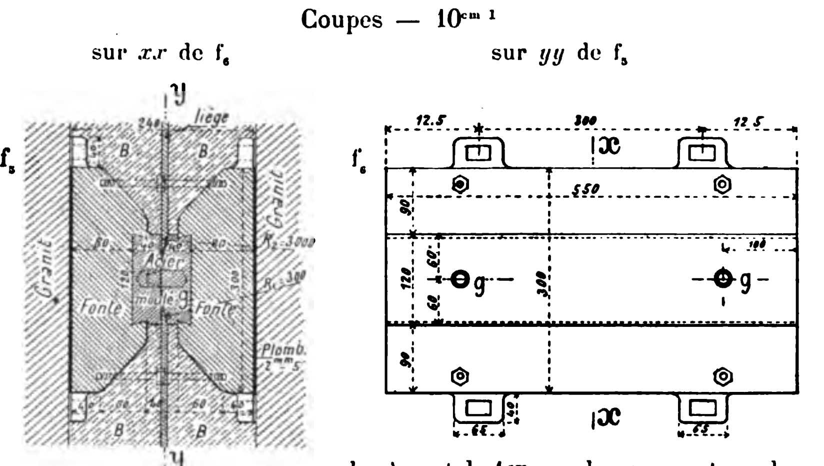
Sur ces légères voûtes, les piliers des petites arches sont peut-être un peu lourds, l'attique un peu trop plein.

En dépit de ces menues critiques, c'est un fort joli pont.

2. Articulations (S_1). — Aux 3 articulations, il y a 33 rotules semblables (f_5, f_6), espacées de 10^{cm}, masquées aux têtes par des voussoirs.

Coupes — 10^{cm} [1]

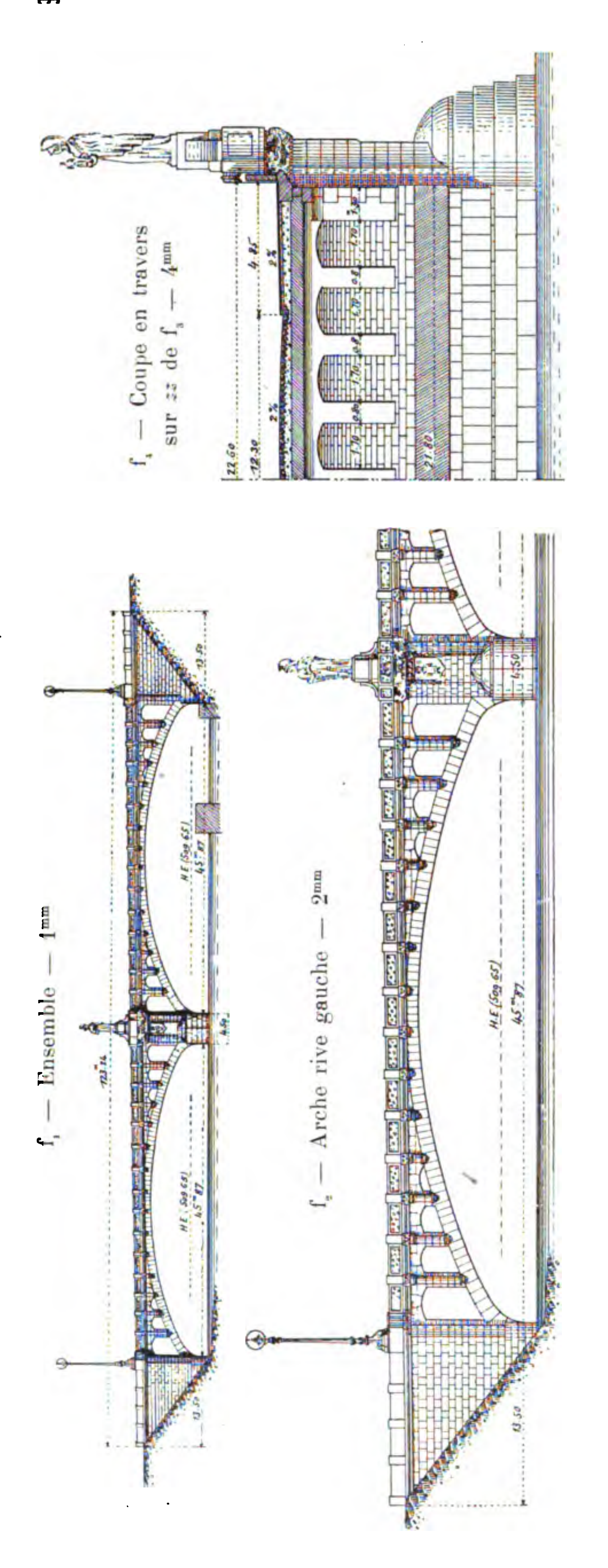
sur xx de f_6 sur yy de f_5



A la clef, tous les sabots, aux retombées, les sabots inférieurs, sont scellés dans le granit.

Pendant la construction, les sabots supérieurs se déplacèrent de 1^{cm} au plus : on eut quelque peine à les ramener.

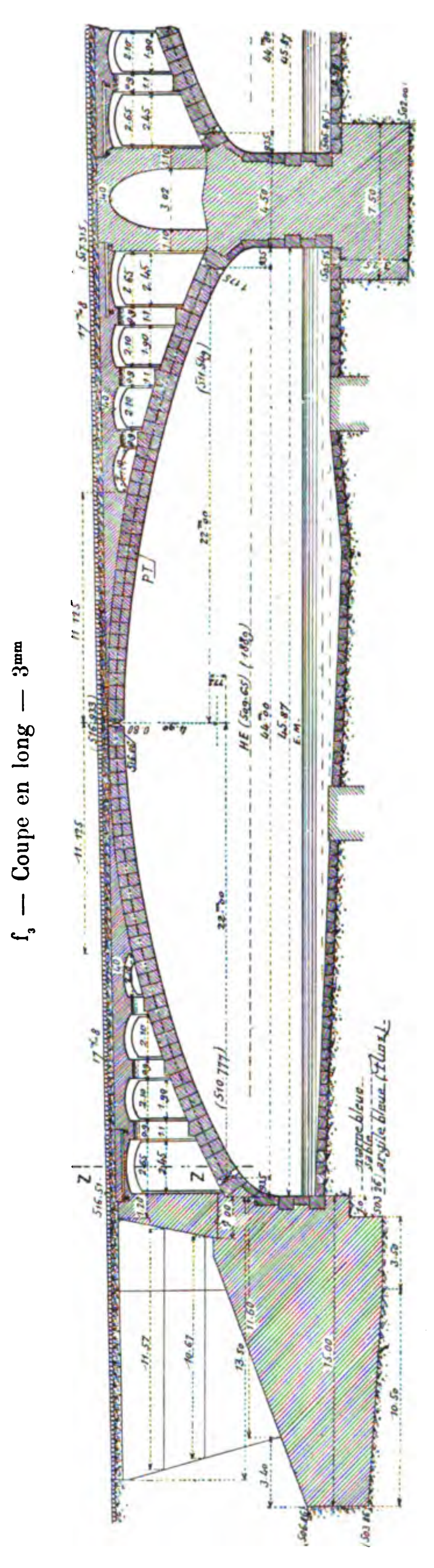
1. — Les goujons *g* n'ont été mis qu'après l'accident du 27 juin 1904.



f_1 — Ensemble — 1mm

f_2 — Arche rive gauche — 2mm

f_4 — Coupe en travers sur zz de f_3 — 4mm



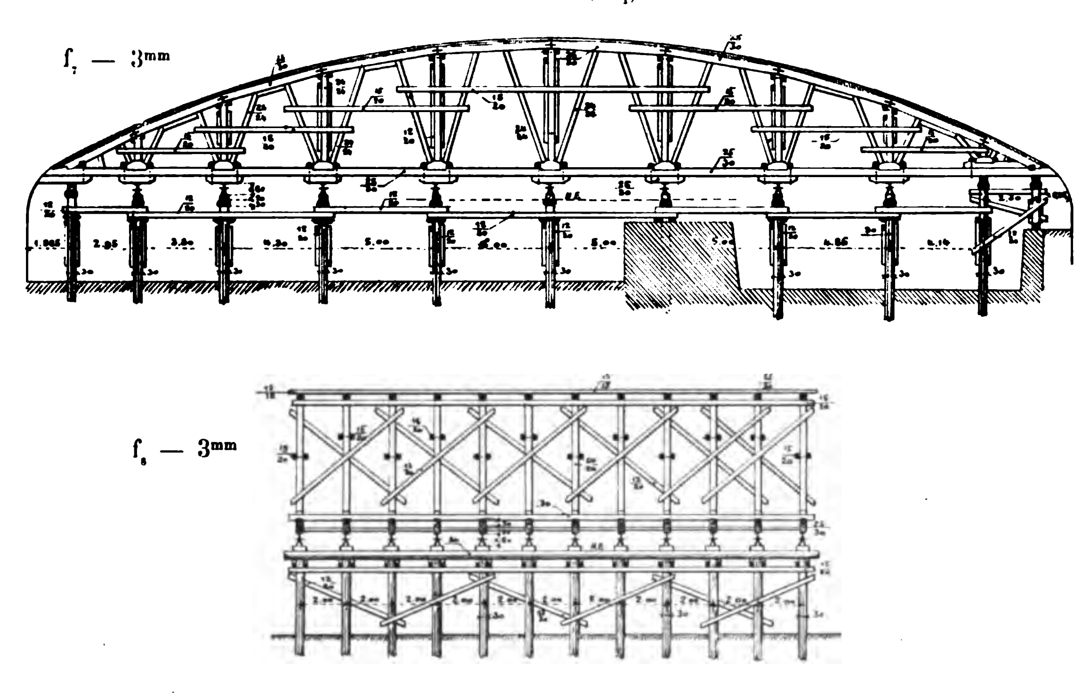
f_3 — Coupe en long — 3mm

Φ_2 (S_1)



3. Cintre de l'arche rive droite (S'_1).

f_7 — 3^{mm}



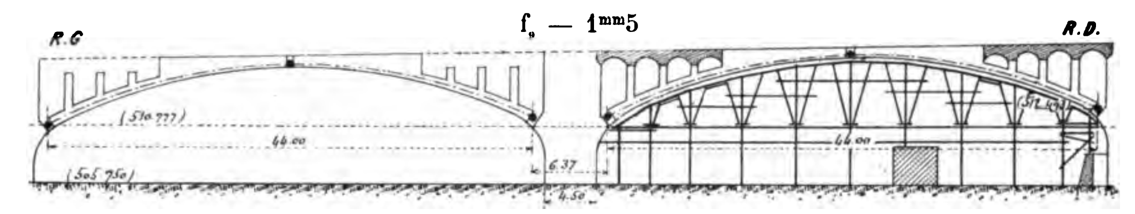
f_8 — 3^{mm}

4. Premier décintrement des deux grandes voûtes (13 juin 1904; matin 6h-8h1/2). — Elles portaient à ce moment les piliers des petites arches et le remplissage en béton du cerveau.

5. Chute des grandes voûtes (27 juin 1904) (S_2).

A. - Etat de l'ouvrage avant l'accident. — Le croquis f_9 montre l'état de l'ouvrage au moment de l'accident, 14 jours après le décintrement.

f_9 — 1mm5



Le cintre de rive gauche était enlevé; celui de rive droite descendu « *d'une* « *largeur de main* ».

B. - Observations faites.

	Arche rive gauche	Arche rive droite — Retombée rive gauche	Arche rive droite — Clef	Arche rive droite — Retombée rive droite
Matin : 7h......	....	....	Elle s'élève aux têtes de 11mm et 13mm	
9h......	....	....	....	Glissement de 2mm sur toute la largeur
Soir : 1h......	....	Glissement uniforme beaucoup plus grand qu'à la retombée rive droite		Glissement de 8mm
1h1/2...		Glissement visible à l'œil Chute		Chute aussitôt après celle de l'autre retombée
	Les deux retombées tombent aussitôt après la chute de l'arche rive droite.	Secousse qui fit croire à un tremblement de terre (S_2). — Durée de la chute : 0"4.		

C. - Etat du Pont (voir f_{10} à f_{17})

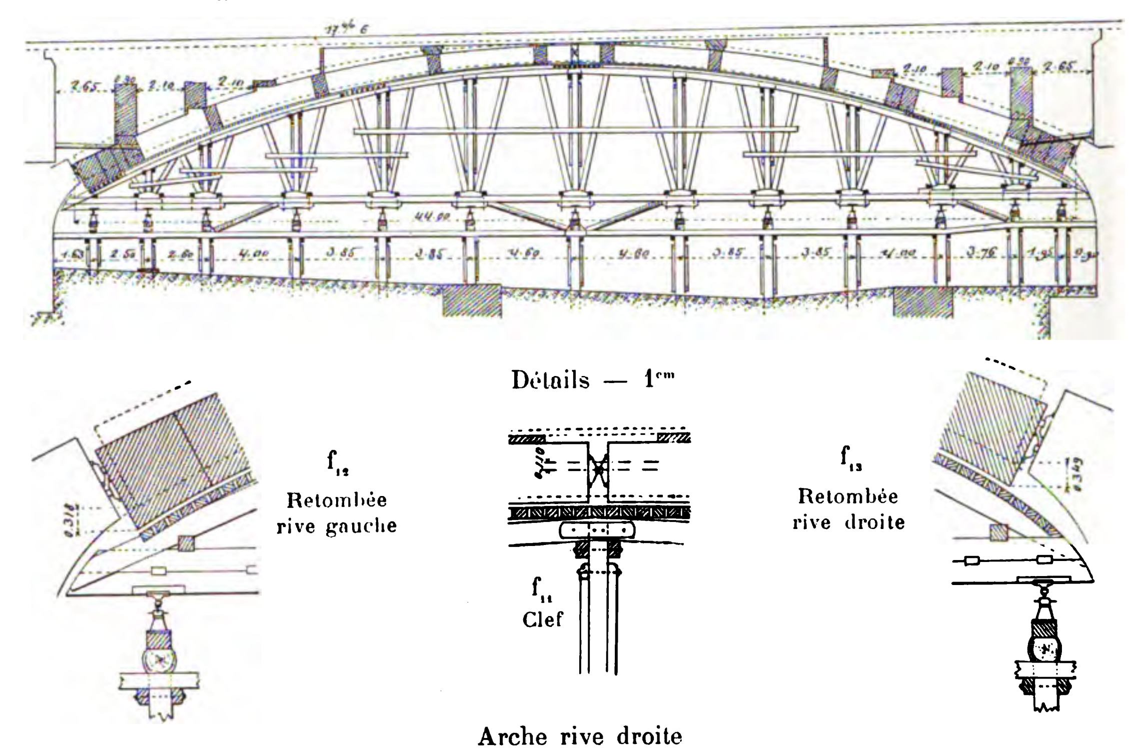
	Arche rive gauche	Arche rive droite
C_1 - Voûtes...........	Les blocs supérieurs des retombées reposent sur les assises inférieures de granit. Très heureusement, le frottement acier sur granit a arrêté le glissement et prévenu la chute de la voûte.	La voûte porte sur le cintre et sur les assises de granit de la pile et de la culée. — Quelques voussoirs de tête, notamment ceux qui masquent les rotules, sont épaufrés. — Quelques voussoirs de granit sont fissurés.
C_2 - Cintre de rive droite....	....	Les semelles transversales sur les vérins sont cassées. — Les fermes portent directement sur eux.
C_3 - Rotules des retombées...	Les sabots supérieurs sont en partie déplacés ; beaucoup sont tombés.	
C_4 - Pile et culées.....	Les parements de tête sont épaufrés.	
C_5 - Piliers des voûtes d'élégissement...	Ils sont pour la plupart déplacés.	

Reconstruction des voûtes (S_3)

On a indiqué par des hachures ce qui a été refait

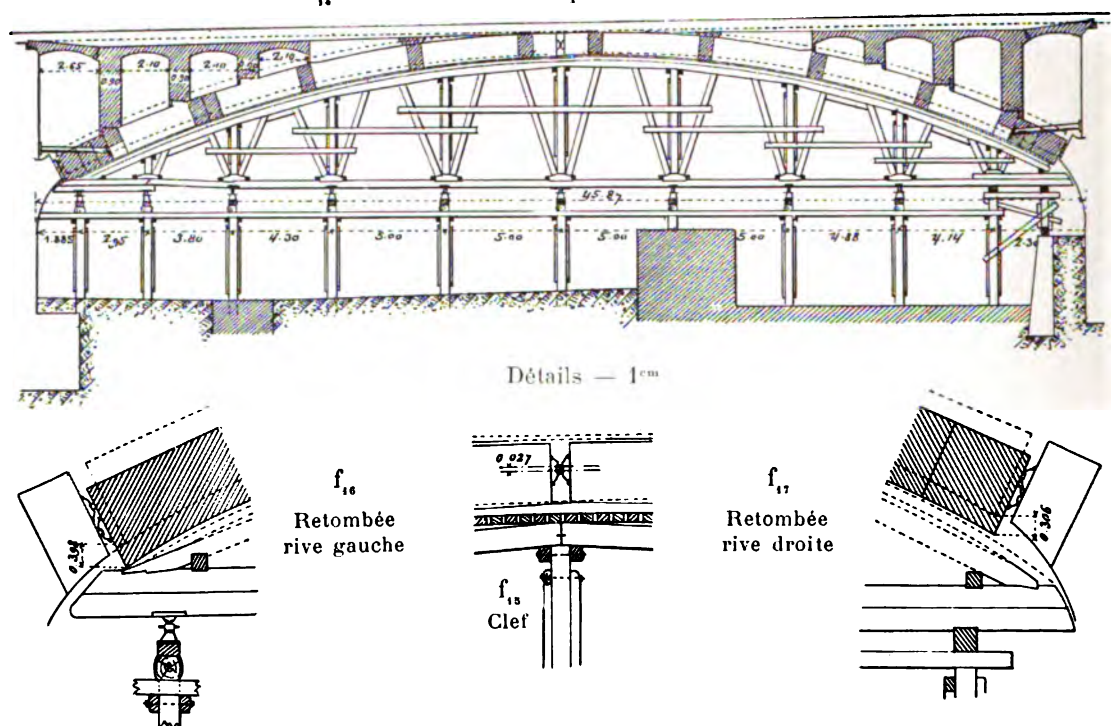
Arche rive gauche

f_{10} — Etat de la voûte après qu'on eut reconstruit le cintre — 3mm



Arche rive droite

f_{14} — Etat de la voûte après l'accident — 3mm



D. - Causes de l'accident (S_1). — Les surfaces de contact des rotules avaient été polies, puis graissées à la stéarine. Le frottement acier sur acier était ainsi descendu de 0,235-0,216 (sans graissage) à 0,022-0,005 (graissage à la stéarine)[2].

Pour les grandes voûtes nues, les réactions aux retombées sont normales aux surfaces de contact.

Quand le poids des voûtes d'élégissement construites sur la voûte rive droite les eut déviées d'un angle égal à l'angle de frottement des surfaces stéarinées, le glissement s'est produit (il n'y avait pas encore de goujons pour l'arrêter).

Sans graissage à la stéarine, les rotules n'auraient pu glisser que pour une déviation de 12° des réactions : aucune surcharge ne l'eût produite.

6. On reconstruit le cintre de rive gauche, on répare celui de rive droite (S_1). — On boucha provisoirement au mortier de ciment les joints entre les rotules des retombées.

Vérins à plate-forme articulée — 5cm

f_{18}

Sous l'arche rive gauche, on construisit un cintre épousant l'intrados déformé.

On remplaça les pièces brisées du cintre de rive droite.

Sous les fermes des 2 cintres, on installa des vérins avec plate-forme P, articulée sur un écrou E un peu mobile sur sa base, pour diriger la réaction suivant l'axe (f_{18}).

7. On remonte les 2 voûtes[3] (S_1). — On enleva les voussoirs épaufrés, plus nombreux aux têtes, et, de plus, quelques assises entières (f_{10}, f_{14}).

Les vérins d'une même file transversale *ab* (f_{19}) devaient s'élever en même temps de la même quantité.

Manœuvre des vérins — Plan — 5mm

f_{19}

Les extrémités de leurs manivelles étaient mues par deux câbles C et C' s'enroulant autour d'un treuil horizontal T.

On avançait par 1/4 de tour, soit, en hauteur, par 3mm7, jusqu'à l'intrados surhaussé de 40mm.

Le cerveau du cintre fut à hauteur avant les retombées ; on le fixa par des chaînes attachées aux palées et on n'agit plus que sur les vérins des retombées.

8. On répare les 2 voûtes (S_1). — Quand les voûtes furent remontées, on reconstruisit les assises enlevées ; on boucha les joints ouverts ; on plaça les assises d'appui des articulations, puis les rotules. La plupart purent être réemployées. Mais on les munit toutes de 2 goujons de 22mm pour empêcher le glissement.

Les arches refaites furent décintrées en mai 1905.

2. — D'après les expériences de M. Föppl (Voir Tome IV, p. 22).

3. — Cette délicate opération fut habilement conduite par M. Probst, Ingénieur en chef de l'Entreprise.

9. Dates (S_1).

Commencement des travaux	septembre 1903
Construction des grandes voûtes (44 jours)	16 mars - 9 mai 1904
Ouverture à la circulation	9 juin 1905
Achèvement du pont	septembre 1905

10. Personnel (S_1).

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.
Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1), gracieusement communiqués par MM. Sager et Wœrner.

S_2. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1904, II, p. 1407 à 1411 : « *Der* « *Bauunfall der aüsseren Maximiliansbrücke in München* », von W. Dietz.

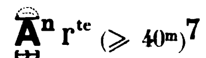
S_3. — Schweizerische Bauzeitung, 13 mai 1905, p. 236 à 239 : « *Die Rekonstruction der* « *Maximiliansbrücke in München* », von Professor Mörsch, in Zürich.

S_4. — Ce que j'ai vu — août 1908.

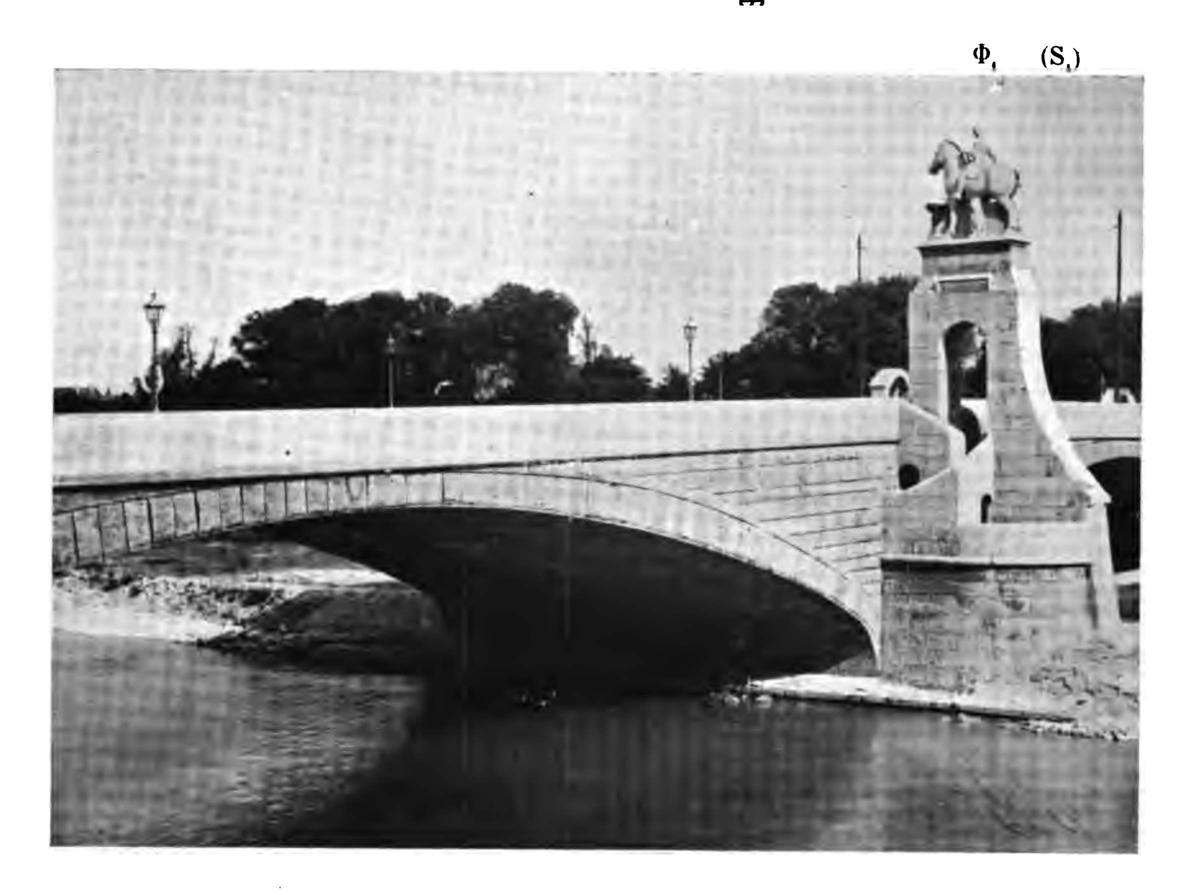
PONT DE WITTELSBACH, SUR L'ISAR, A MUNICH *(BAVIÈRE)*

en prolongement de la Kapuzinerstrasse

1904–1905



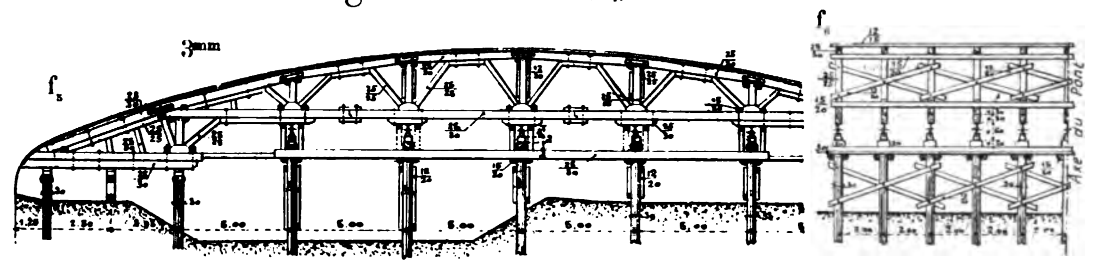
Φ_1 (S_1)



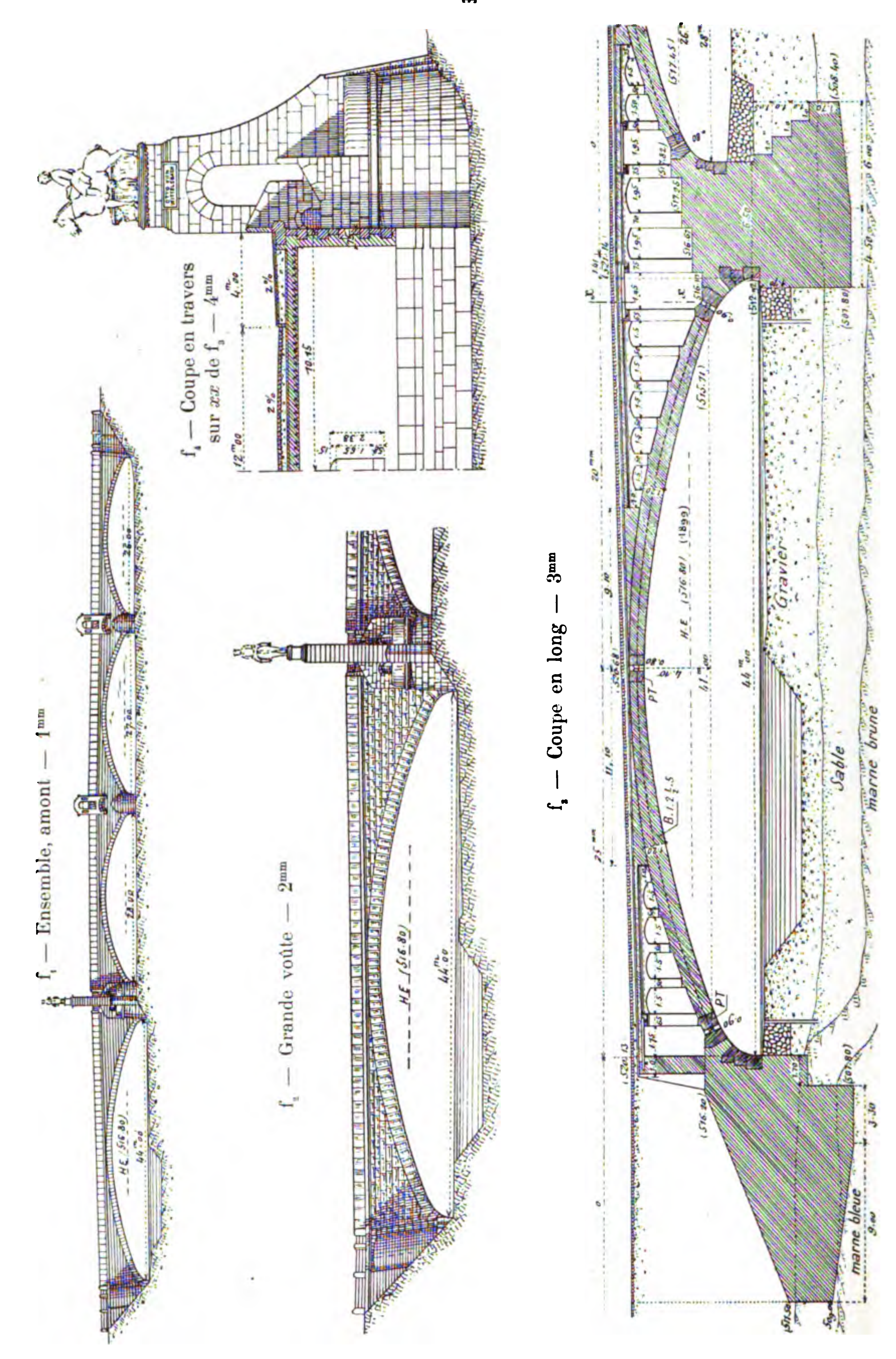
1. Aspect. — Sur l'avant-bec de la pile-culée de rive droite est édifié un piédestal portant la statue équestre d'Otto de Wittelsbach. Ce cheval est juché un peu haut.

2. Articulations. — Les mêmes qu'au pont Maximilien [1].

3. Cintre de la grande voûte (S_1).



1. — A^n r^{te} $(\geqslant 40^m)^6$, f_5 et f_6. Tome IV, p. 192.



f₁ — Ensemble, amont — 1^mm

f₂ — Grande voûte — 2^mm

f₃ — Coupe en long — 3^mm

f₄ — Coupe en travers sur xx de f₃ — 4^mm



4. Personnel (S_1, S_2).

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville.

Architecture : M. le Professeur Th. Fischer (S_3).

SOURCES :

Dessins et renseignements gracieusement communiqués :

S_1, — par M. Schwiening ;

S_2, — par MM. Sager et Wœrner.

S_3. — Schweizerische Bauzeitung, 23 septembre 1905, p. 166 : « *Die Eröffnung der* « *Wittelsbacherbrücke in München* ».

S_4. — Ce que j'ai vu, - août 1908.

PONT SUR LA MOSELLE, PRÈS DE MOULINS-LEZ-METZ [1]

(LORRAINE ALLEMANDE)

Route de Moulins à Montigny

1904-1905 $A^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{8}$

Φ_1 (S_1)



1. Aspect (S_1). — Le dos d'âne est un peu trop accusé (30^{mm}).

Les lourdes culées arrêtent bien ces arcs légers.

Comme à Malling [2], les becs des piles coupent durement les retombées des voûtes.

Les bandeaux, tympans, parements en élévation des culées, sont en moellons équarris jaunes, à bossages.

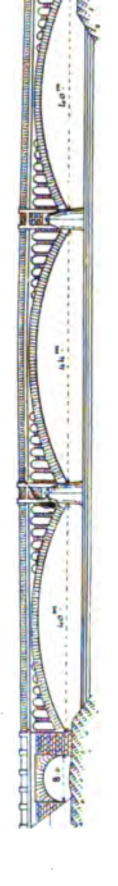
Aux têtes, les articulations ont l'aspect de libages piqués.

Les voûtes d'élégissement voisines de la clef sont aveuglées par un mur blanc.

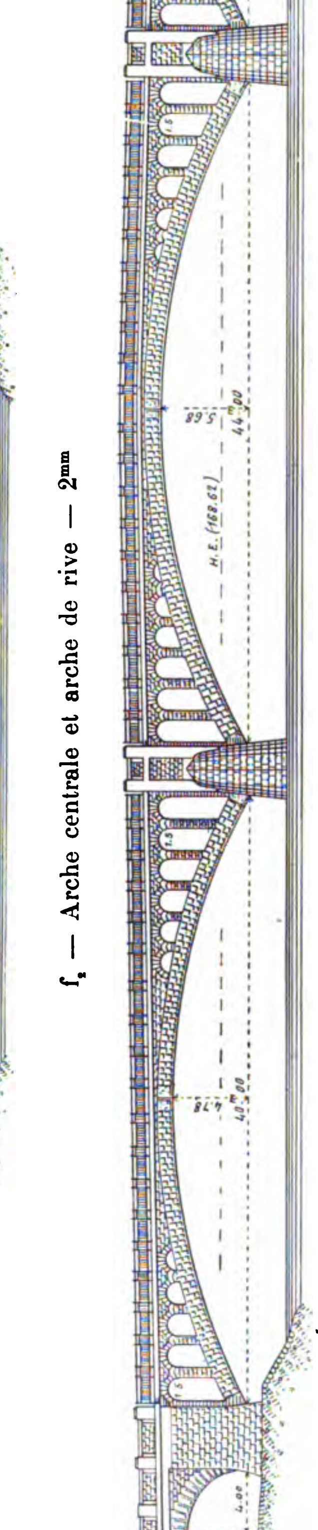
Le béton n'apparaît qu'en douelle. Il affleure les retours des bandeaux ; aux voûtes des culées et aux grandes voûtes de rive au-dessus du chemin de halage, il a été piqué, pour effacer l'empreinte des voliges du cintre.

1. — à 6^{k} en amont de Metz, à 1^{k} environ de la station de Moulins (Ligne de Metz à Verdun).

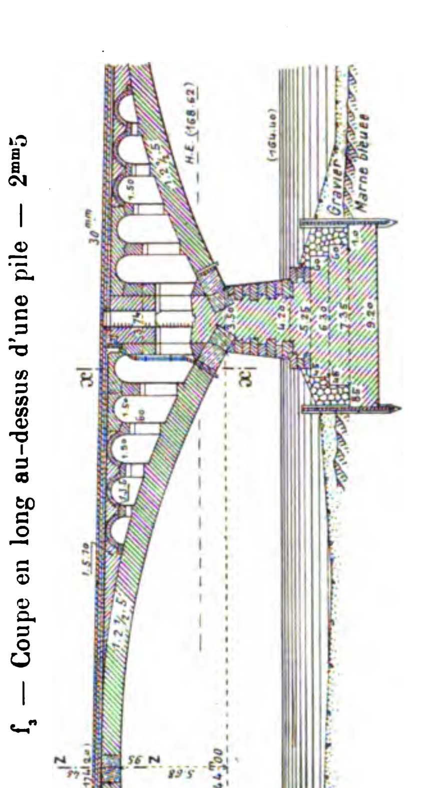
2. — $A^{n}\ r^{te}\ (\geqslant 40^{m})^{1}$ — Tome IV, p. 175.



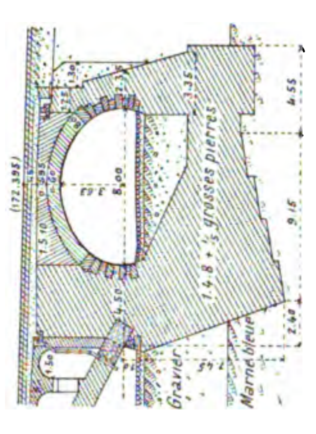
f_1 — Ensemble — $0^{mm}75$



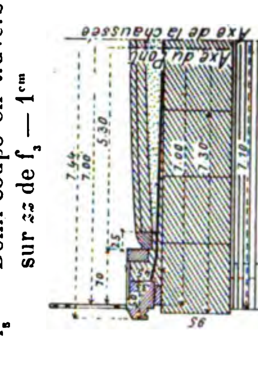
f_2 — Arche centrale et arche de rive — 2^{mm}



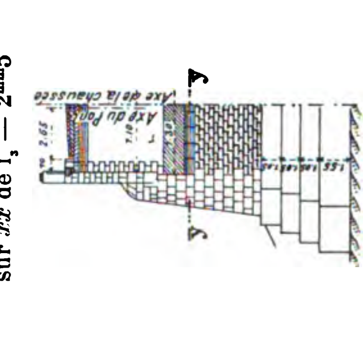
f_3 — Coupe en long au-dessus d'une pile — $2^{mm}5$



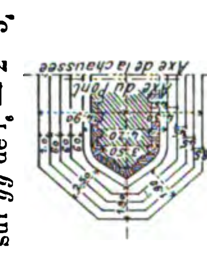
f_4 — Coupe en long d'une culée — $2^{mm}5$



f_5 — Demi-coupe en travers sur zz de f_3 — 1^{cm}



f_6 — Demi-coupe en travers sur xx de f_3 — $2^{mm}5$



f_7 — Demi-coupe horizontale sur yy de f_6 — $2^{mm}5$

2. Articulations en béton [3].

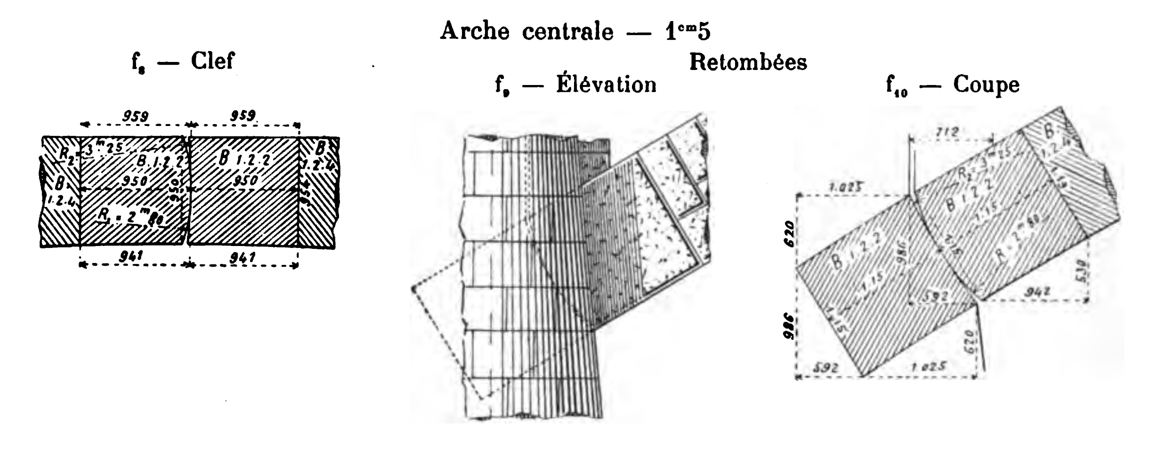
Arche centrale — 1^{cm}5

f_8 — Clef

Retombées

f_9 — Élévation

f_{10} — Coupe



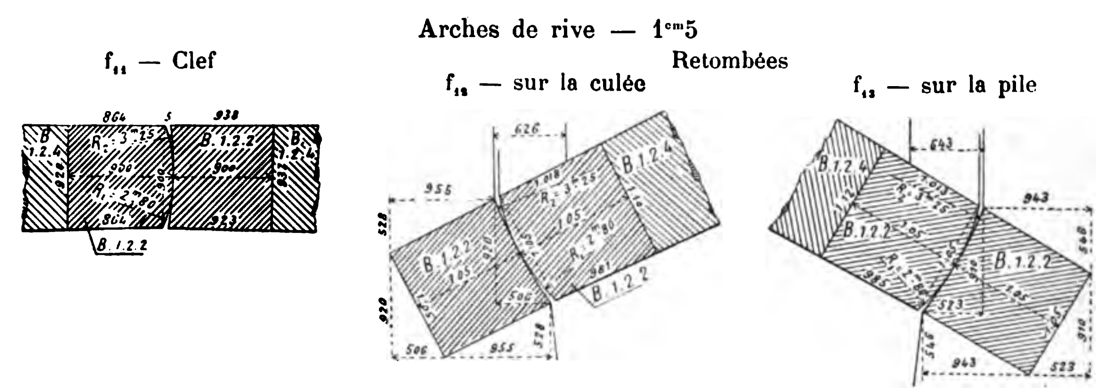
Arches de rive — 1^{cm}5

f_{11} — Clef

Retombées

f_{12} — sur la culée

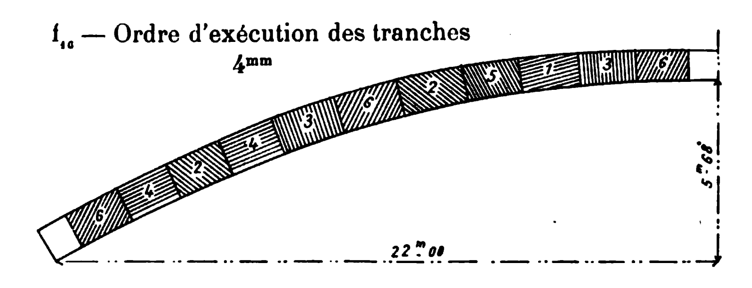
f_{13} — sur la pile



3. Exécution des grandes voûtes (S_1). — Le béton était pilonné par tranches, dans l'ordre des numéros de f_{16}.

f_{16} — Ordre d'exécution des tranches

4^{mm}



3. — Voici comment on les a moulées :

Les parois latérales des moules sont en bois revêtu de tôle. Le fond, en fer, a la courbure voulue ; il est poli avec soin.

Pour avoir une surface de roulement plus unie, on applique contre le fond 3^{cm} à 4^{cm} de mortier (1' de ciment, 1' de sable fin) ; puis on pilonne le béton par couches de 10^{cm} à 15^{cm}.

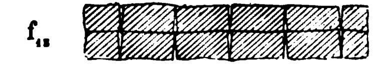
Aux naissances, on a, le plus souvent, disposé sur toute la largeur du pont un gabarit convexe en fer, et pilonné en place, contre la culée, les blocs concaves.

Si l'on croisait les joints des deux files d'une articulation, les blocs s'appuieraient l'un sur l'autre par des points isolés (f_{14}). Il vaut mieux que les joints se continuent (f_{15}) : le contact se fait sur toute la largeur des blocs (S_2).

f_{14}



f_{15}



4. Dates d'exécution des voûtes (1905).

	Voûtes		
	de rive	centrale	de rive
Commencement	16 mai	2 juin	26 mai
Fin	25 mai	9 juin	31 mai

Décintrement des 3 voûtes .... 29 juillet

5. Personnel (S_1).

Ingénieur. — *Projet et Direction des Travaux :* M. Blumhardt, « Regierungs-und Baurat » à Strasbourg (Service de la Construction des Routes d'Alsace-Lorraine).

Entrepreneurs : MM. Windschild et Langelott, de Cossebaude, près Dresde.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1) gracieusement communiqués par M. Blumhardt.

S_2. — Deutsche Bauzeitung, 1908, 23 mai, p. 283 à 288 ; - 3 juin, p. 303 et 307 : « *Die* « *Anwendung von Gelenken bei Brückenbauten* ». Communication faite au XI[e] Congrès du « Deutschen Beton-Vereins » tenu à Berlin en 1908, par M. A. Köhler, Ing. Dipl., Directeur technique de la Maison Windschild et Langelott.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1909.

PONT SUR LE NECKAR, A **MANNHEIM** *(ALLEMAGNE - Grand-Duché de Bade)*

Route de Neckarstadt à Mannheim

1905–1908 $\mathbf{A}^{n}$ r^{te} ($\geqslant$ 40^{m})9

Φ_1 (S_2)



1. Voûtes de rive rampantes. — Pour résister à la poussée de l'arc central, les retombées des voûtes de rive sur les culées extrêmes sont à $1^{m}30$ plus bas que leurs retombées sur les piles.

2. Bandeaux. — Les rotules sont cachées aux têtes par des voussoirs de granit, bien distincts des autres voussoirs, qui sont en grès rouge, par leur couleur et la sculpture de leur surface (Φ_1, Φ_2, Φ_3).

On voit un peu trop le renflement des reins (S_2).

3. Tympans. — Au droit des articulations des reins, ils sont coupés par un joint vertical ouvert, de 30^{mm}, très apparent (Φ_2, Φ_3).

Il eût peut-être convenu de bien séparer la partie du tympan mobile avec la voûte, de sa partie fixe avec la pile et la culée, par un appareil différent, par un cadre,... (S_2).

Les tympans sont, comme les bandeaux et le couronnement, en grès rouge. L'arche centrale, les candélabres, les poteaux de trolley, sont peints en vert. Ces deux couleurs complémentaires se heurtent.

Φ_2 (S_3)



4. Plinthe. — Elle a peu de saillie (S_3).

5. Chaussée. Trottoirs. — La chaussée est, sur chaque arche en béton, en rampe assez forte : 1/37, soit 27^{mm} par mètre.

Les trottoirs sont faits de plaques de béton armé recouvertes d'asphalte.

6. Décintrement. — Au décintrement de l'arche rive droite, sa pile-culée s'inclina vers la rivière; la voûte tassa plus qu'on l'avait prévu, et l'arc d'acier se releva ; il reprit son niveau sous une charge de 120 tonnes.

Le décintrement de chaque arche dura 4 heures.

7. Achèvement du pont. — Le tablier achevé, on a rempli au mortier de ciment l'intervalle entre les sommiers de granit des rotules, en maintenant le joint d'articulation par une feuille de feutre asphalté.

8. Épreuves.

— On chargea chaque arche, puis tout le pont, d'abord d'un seul côté, puis entièrement, de 400^k de gravier par m. q.

On fit ensuite passer sur la chaussée des voitures de 15 et 20 tonnes.

Les épreuves durèrent 10 jours.

On observa une légère inclinaison des piles et culées.

Φ_3 (S_1)



9. Personnel.

Projet (primé au Concours) : MM. Grün et Bilfinger, de Mannheim.
Entreprise : MM. Ph. Holzmann et Cie, de Francfort-sur-le-Mein.

SOURCES :

S_1. — Renseignements qu'ont bien voulu me communiquer MM. Grün et Bilfinger.

S_2. — Zentralblatt der Bauverwaltung, 20 mai 1908, p. 277 à 279 : « *Strassenbrücke über* « *den Neckar in Mannheim* ».

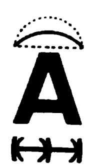
S_3. — Ce que j'ai vu, — août 1908.

Tout ce qui n'est pas spécifié S_1 ou S_3 est de S_2.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS ROULANTES [1]

ARCS ASSEZ SURBAISSÉS [2]

 [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série A[1] r[te] ($\geqslant$ 40[m]) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.
2. — Série placée ici, après les arcs très surbaissés, au lieu de l'être avant. — J'en ai connu trop tard le seul pont.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/$\overline{0^{m}01}^{2}$ Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Gräveneck** *Prusse, – Hesse* 1911-1912 Â[1] r^{te} (⩾ 40^{m})[1]	*104^{m}61* 15^{mm} 15^{m}19	5^{m} 70 *5^{m} 00* Pas de fruit 0^{m}42	Portée entre appuis : 48^{m},00 Entre les axes des rotules : 48^{m},425 *7^{m} 75* $\frac{1}{6,248}$ = 0,160 *Rayon de courbure à la clef :* *36^{m} 85*	0^{m},60 *1^{m} 02* 0^{m}75	Béton armé par des grillages en fers ronds de 8^{mm} normaux à la fibre moyenne Surfaces de roulement en mortier Ciment 1^{v} Sable du Rhin 1^{v}5 Béton : Ciment 1^{v} Sable du Rhin 1^{v}5 Eclats de basalte de 10^{mm} à 15^{mm} 2^{v}5	Béton Ciment.......... 1^{v} Sable du Rhin... 2^{v} Pierre cassée { de 5 à 20^{mm} - 2^{v} / de 40 à 50^{mm} - 3^{v} } 5^{v}	Pressions maxima : (sans surch. / avec surch.) Clef 20^{k} / 23^{k}2 Joints de rupt. 12^{k}4 / 33^{k}6 Retombées 19^{k}4 / 22^{k}5 Pas de tension 500^{k}/1^{m2} et Rouleau à vapeur de 15^{T} 1/6 à 1/7 du poids mort	1° Plate-forme en béton armé sur piliers carrés de 25^{cm} et 30^{cm} d'arête 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE A[1] r^te (>40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q**
	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE							
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	**DÉCINTREMENT** État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	**TASSEMENTS DE LA CLEF** sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Gravier, Argile, Blocs de rocher. Pression maxima : 4k5 *Épuisements sans batardeaux*	Fixe Montants et contrefiches Boîtes à sable	5 *18cm* 1m20 *60mm*			Par tranches isolées	Plate-forme bétonnée. Joint vide ménagé entre la clef et chaque retombée *46 jours* 4 janvier	t_c = 28mm t'_v = 14mm	Q = 2160mc Q : S_p = 3mc62 Q : W = 0mc38

	Fondations	Élévation	Ensemble
D	32084f	74040f	106124f
D : S_p	53f8	124f2	178f0
D : W	5f7	13f2	18f9
D : Q	»	»	49f1

10	11	12	13	14	15	16	17	18

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â¹ rte (⩾ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LA LAHN, A GRÄVENECK *(PRUSSE, - Hesse, - Présidence de Wiesbaden)*

Route de Wirbelau à Gräveneck

1911-1912 

Φ₁ – amont (S'''₁)



1. Une grande voûte entre deux petites. — Sous l'arche de rive gauche passent deux voies de chemin de fer ; l'arche de rive droite sert de décharge.

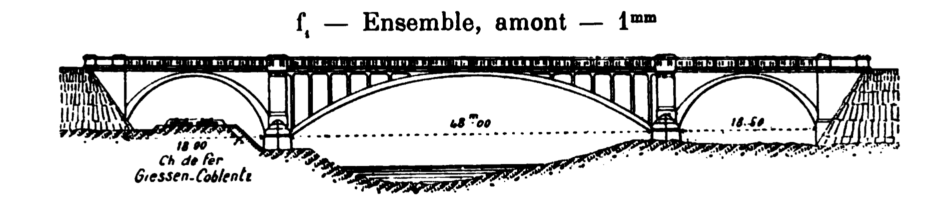
Pour qu'elles fissent culées, on les a élargies de 0m50, et chargées de béton jusqu'à la chaussée (f_1).

2. Pourquoi on a articulé l'arche centrale. — 1° – Parce que cet arc mince, non armé, est soumis à de grands écarts de température ;

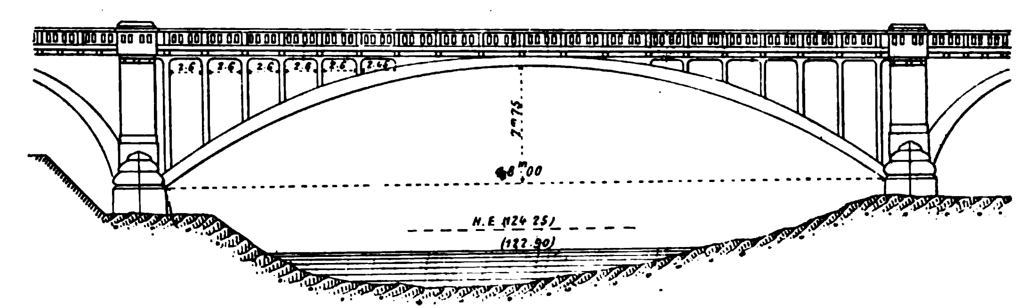
2° – Parce que le sol sous la pile rive gauche est peu résistant.

3. Pourquoi on a fait les rotules en béton armé. — Parce qu'elles sont plus homogènes qu'en pierre.

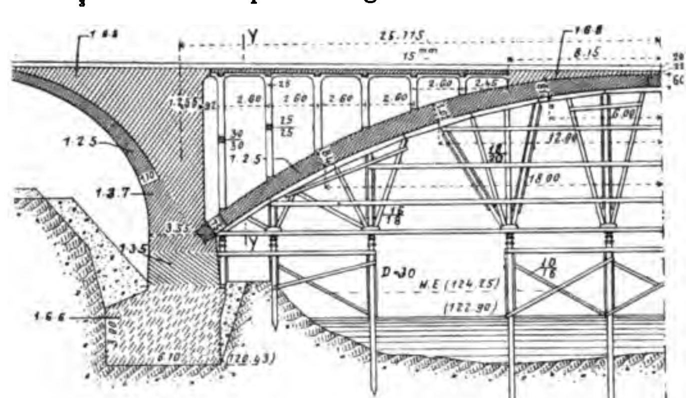
f₁ — Ensemble, amont — 1mm



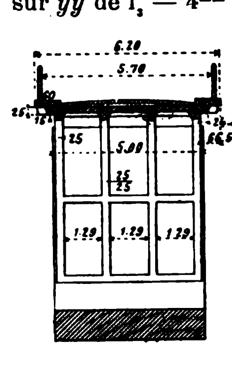
f₂ — Grande voûte — 2mm



f₃ — Demi-coupe en long, et cintre — 2mm5



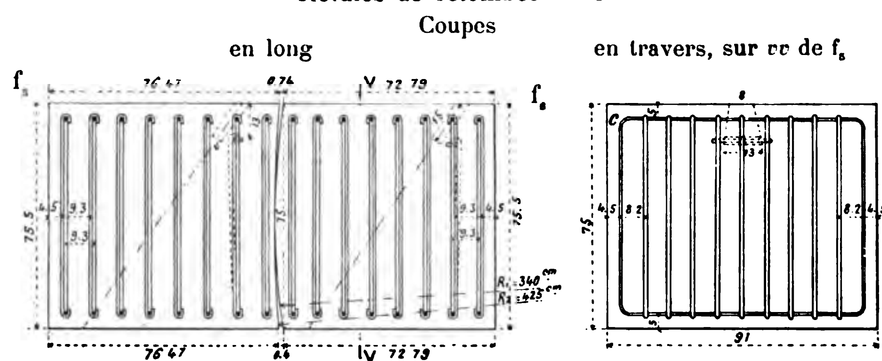
f₄ — Coupe en travers sur yy de f₃ — 4mm



Rotules de retombée — 4cm

Coupes

en long — en travers, sur cc de f₆



4. Rotules en béton armé. — *A. - Projet.* — Les cadres *c* (f₆) maintiennent les fers pendant l'exécution, et frettent le béton.

Il n'y a pas de fers dans le sens du pilonnage.

B. - Exécution. — Les moules étaient en bois recouvert de tôle ; la base, en plâtre très exactement dressé suivant la surface cylindrique de roulement : le plâtre a été remplacé à chaque bloc. On l'enduisait de mortier, puis on pilonnait le béton à l'état de terre humide, par couches de 10cm.

Avant de placer les fers, on les enduisit d'un lait de ciment.

On mit les rotules en place au bout de 2 à 3 mois.

C. - Expériences au Laboratoire mécano-technique de Dresde. — Voici ce qu'ont donné, à un an, des rotules de mêmes dimensions que celles du pont :

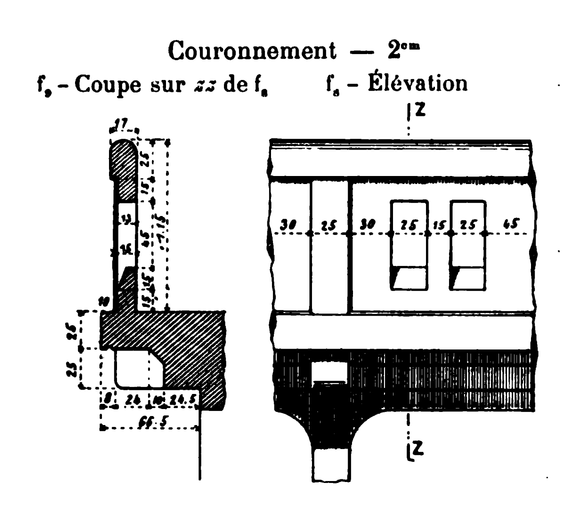
f_7 — L, h, e, R_1, R_2

	Dimensions en 0m01			Charge en tonnes par 0m01 d'arête de contact, provoquant les fissures	Compression, en 0m001, de la longueur L (f_7) sous une charge de 11T par 0m01 d'arête de contact
	e = h =	R_1	R_2		
Clef	60c	350c	450c	10T	2mm06
				10	2 45
				11	1 95
Retombées	75,5	340	425	10	1 86
				10	2 01
				10	2 36

La charge enlevée, les fissures se sont refermées.

Le coefficient de sécurité, par rapport à la charge des premières fissures, est entre 6 et 7.

Les empreintes de contact étaient très irrégulières [1].



5. Joints de dilatation.

— Il y en a au-dessus des rotules, puis 2 autres dans la plate-forme, ceux-ci, jusqu'après décintrement.

6. Couronnement (f_8, f_9).

— Les bahuts des parapets sont en blocs séparés, longs de 1m, de béton moulé.

1. — Largeur de contact $2x$ et pression maxima au contact MAX β, d'après les formules de Hertz et de Barkhausen (S_4) (Voir Tome IV, p. 11 et 13), avec $E = 1,8 \times \overline{10}^5$ (Kg/$\overline{0^m01}^2$) :

	Charge en Kg par 0m01 d'arête de contact N	$2x$ (en 0m01) d'après		MAX β (en Kg/$\overline{0^m01}^2$) d'après	
		Hertz	Barkhausen	Hertz	Barkhausen
Clef........	1394k	10mm8	17mm6	164k	90k
Retombées.	1683	12 1	20 4	177	93

7. Chape. — Sur la plate-forme, on a étalé des feuilles de plomb, puis de l'asphalte, puis du béton ; sur l'extrados, un enduit étanche.

8. Matériaux. — Les arêtes des avant-becs sont en pierre.
Les parements vus sont en béton à grain fin.
En douelle, on a enlevé les empreintes du platelage.

9. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	20 juin 1911
Grande voûte	15-19 novembre
Décintrement	4 janvier 1912
Ouverture à la circulation	1er octobre

10. Personnel. — *Projet (au concours), et Entreprise :* MM. Hüser et Cie, d'Obercassel.

SOURCES :

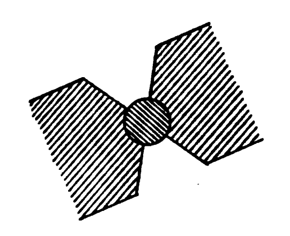
S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), renseignements (S''_1) et photographie (S'''_1), gracieusement communiqués par M. Schluckebier, — juillet 1913.

S_2. — Beton und Eisen, 12 juin 1913, p. 217 à 220 : « *Brücke über die Lahn bei* « *Gräveneck* », von Reg.-Baumeister a. D. Schluckebier, - Obercassel (Siegkr.).

Texte. — Ce qui n'est pas spécifié S''_1 est de S_2.
Dessins. — Ils sont réduits de S'_1.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS TOURNANTES [1]



Symbole : [2]

Voir Tome IV, Livre I :

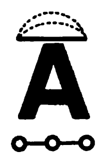
1. — p. 21, pour la définition de l'articulation tournante,

2. — p. 28, pour le sens du symbole.

VOÛTES ARTICULÉES

ARTICULATIONS TOURNANTES [1]

ARCS TRÈS SURBAISSÉS [1]

 [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série A[1] r[te] (⩾ 40m) [1]

1. — Pour le classement des voûtes articulées et le sens des symboles, voir Tome IV, Livre I, p. 28 et 29.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

<table>
<tr><th rowspan="2">PONT
Date
Symbole
1</th><th colspan="8">PROJET</th></tr>
<tr><th colspan="2">ENSEMBLE</th><th colspan="5">GRANDE VOÛTE</th><th></th></tr>
<tr><th></th><th>Longueur entre abouts des parapets
Déclivités
Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage
2</th><th>Largeurs (entre parapets, entre tympans sous la plinthe)
Fruit des tympans
Revanche de la chaussée sur l'extrados
3</th><th>INTRADOS
Portée
Montée
Surbaissement
Rayons
4</th><th>ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES
Clef
Joints de rupture
Retombées
5</th><th>ROTULES
Pour les dimensions, pressions,... voir Tome IV, Livre III.
6</th><th>MATÉRIAUX
Mortier
Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment
7</th><th>PRESSIONS
en kg/0m01²
Surcharges supposées
8</th><th>1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS
2° DÉCORATION DES TÊTES
9</th></tr>
<tr><td>d'
Inzigkofen
Hohenzollern
1895
Â[1] r^{te} (⩾ 40m)1</td><td>50m
25mm 25mm
6m60 étiage</td><td>3m80
3m 60
entre bandeaux à la clef
Fruit de la voûte : 1/8,76
Tympans à fruit courbe
»</td><td>Sur le sol de fondation :
47m,90
8m 30 moyenne
1/5,771 = 0,190
Rayon de courbure à la clef : 65m
Entre axes des rotules :
43m,00
4m 38
1/9,81 = 0,102</td><td>0m,70
1m,10
0m78</td><td>Tourillons et balanciers en fonte</td><td>B [1]
fait à la main
1v Ciment
Stuttgarter Zement-fabrik Blaubeuren
et
(Sable / Gravier / Pierre cassée)
Corps : 2v5 / 0v5 / 4v
Près des rotules : 2 / 0.5 / 2.5
Sommiers : 1.5 / 0.75 / 0.75</td><td>Pression maxima :
Clef : 43k9
Joints de rupture : 37k7
Tension — 1k
Retombées : 42k9
Dans les autres sections: 37k 7
400k/1m²
et
Rouleau à vapeur de 15T</td><td>1°
Plate-forme en béton sur 3 murs de 0m70, espacés de 0m675, percés de 14 voûtes transversales vues, en plein cintre de 1m15 et 1m20 sur piles de 0m60
2°
Moulures comme d'un arc en fonte</td></tr>
<tr><td>de
Neckarhausen
Hohenzollern
1899-1900
Â[1] r^{te} (⩾ 40m)2</td><td>55m 50
15mm 15mm
8m étiage</td><td>5m,50
4m 80
entre bandeaux à la clef
Voûte à fruit parabolique
Tympans à fruit courbe
»</td><td>Sur le sol de fondation :
59m,40
12m 585 moyenne
1/4,719 = 0,212
Rayon de courbure à la clef : 90m
Entre axes des rotules :
50m,00
4m 545
1/11 = 0,091</td><td>0m,85
1m,20
0m90</td><td>Tourillons en acier
Balanciers en fonte</td><td>B [1]
Ciment lent...... 1v
Stuttgarter Zement-fabrik Blaubeuren
Sable............ 2v5
(Porphyre ou calcaire, broyés)
Pierre cassée.... 5v</td><td>Pression maxima dans la voûte :
39k 8
Trottoirs: 500k/1m²
Chaussée: 400k/1m²
et
Rouleau à vapeur de 15T</td><td>1°
Plate-forme en béton de 0m32 sur 4 murs de 0m60, espacés de 0m73, percés de 14 voûtes transversales vues, en ellipse de 1m34 sur piles de 0m52
2°
Moulures comme d'un arc en fonte</td></tr>
</table>

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

SÉRIE $\overset{\circ}{\text{A}}^{1}$ r^te ($\geqslant 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg : 0^m01^2 *Procédé*	FERMES: Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES: Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses: Totaux	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses: par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rive droite : *Rocher* » Pression maxima : 28^k6 » —— Rive gauche : *Gravier* » Pression maxima : 3^k7 *Quelques épuisements dans une enceinte de pieux et palplanches*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Boîtes à sable	4 *Fermes de rive :* 16^{cm} *Fermes intermédiaires :* 18^{cm} 1^m07 153^{mm}	3949^f	18^f7	A pleine épaisseur, à partir des retombées, par tranches de 1^m à 1^m30	Tympans achevés *35 jours* 12 octobre	am^t / aval (mm) t_c 49 / 43 t'_v 7.5 / 7.7 t''_v (121 j.) 26.5 / 29.5 Recul de la culée rive gauche au décintrement $0^{mm}3$	Q = 634^{mc} Q : S_p = $3^{mc}33$ Q : W = $0^{mc}45$ D = $32\,824^f$ D : S_p = 172^f8 D : W = 23^f3 D : Q = 51^f8
Marne dolomitique — 6^m *Épuisements en fouille blindée*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	4 18^{cm} 1^m30 200^{mm}	100^{mc} » 6125^f	$0^{mc}35$ » 21^f9	A pleine épaisseur, à partir de la clef, par tranches symétriques	Couronnement posé *56 jours* 28 août	am^t / aval (mm) t_c 66.7 / 78 1 t'_v 12.1 / 12.5 t''_v (215 j.) 26.9 / 31.3	Q = 1440^{mc} Q : S_p = $4^{mc}72$ Q : W = $0^{mc}62$ D = $86\,800^f$ D : S_p = 284^f3 D : W = 37^f2 D : Q = 60^f3

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
PONT Date Symbole 1	*Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	Largeurs { entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons* 4	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées 5	ROTULES *Pour les dimensions, pressions,... voir Tome IV, Livre III.* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en $kg/\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
du **Prince-Régent** à **Munich** *Bavière* 1900-1901 A[1] r^te^ (⩾ 40m)3	*103m* Courbe de la chaussée, en profil en long : $x^2 = 2730\,y$ Déclivité maxima : 18mm 11m20 étiage	{ 17m 20 / *17m 00* Pas de fruit 0m46	Arc avec raccord vertical aux retombées Portée entre appuis : 62m,40 Entre les axes des rotules : 63m,00 *6m 50* $\frac{1}{9,692} = 0,103$ *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 80m*	1m,00 *1m,48* 1m20	Tourillons en acier coulé entre balanciers en fonte appuyés sur sommiers en granit	PT [1] Muschelkalk *Ciment Portland 700k* *Fabriques de Karlstadt sur le Mein et Dyckerhoff et fils d'Amöneberg sur le Rhin* *Sable tamisé* *Joints de 25mm*	Pression maxima : Clef : 41k7 Joints de rupture : 39k Retombées : 43k 500k/1m2 et Rouleau à vapeur de 20T	1° Entre tympans pleins, voûtes d'arête en béton sur piliers en maçonnerie de 52c × 52c 2° *A la clef. Cartouche en bronze aux armes royales* *Sur les tympans, monogramme du Prince-Régent*
Max-Joseph à **Munich** *Bavière* 1901-1902 A[1] r^te^ (⩾ 40m)4	*104m 60* 20mm 20mm (profil en toit) 11m50 étiage	{ 18m,10 / *18m 60* Tympans à fruit courbe 0m475	Arc avec raccord vertical aux retombées Au-dessus des naissances : 64m,00 *8m 00* $\frac{1}{8} = 0,125$ Entre les axes des rotules : 60m,00 *6m 00* $\frac{1}{10} = 0,10$ *Rayon de courbure de la fibre moyenne à la clef : 67m*	1m,05 *1m,40* 1m20	Comme au Pont du Prince-Régent A[1] r^te^ (⩾ 40m)3	PT [1] Muschelkalk *Ciment Portland* *Dyckerhoff et fils* *700k*	Pression maxima (au joint de rupture) 45k 500k/1m2	1° En travers, 10 voûtes vues, en ellipse, de 2m53 à 3m; en long, 6 voûtes, en ellipse, de 2m20 Piliers de 90×70c Tout en béton de gravier 2° *A la clef. Cartouche en bronze aux armes de Munich*

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

SÉRIE A[1] r^{te} (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

EXÉCUTION — FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES — Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses — Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses — par mq de douelle[2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p[3] { de volume « utile » W[4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne *Résistance : 40k à 50k/0m01²* *Gravier* − 6m sous le lit Pression maxima, avec surcharge: 4k8 *Épuisements*	Fixe Montants et contrefiches *Pin et Sapin* *Nœuds en chêne* Vérins à vis	9 *24cm* 2m00 *120mm*	650mc 3000k 49360f	0mc61 2k8 46f1	Voussoirs posés à sec, avec joints de 2cm5, matés ensuite au mortier à Ciment 1v Sable tamisé 1v	Tympans et la plupart des voûtes d'évidement, exécutés *55 jours* 29 mai	t_c = 55mm t'_v = 34mm Recul de la culée RG 2mm	Q = 9800mc Q : S_p = 5mc53 Q : W = 0mc65 **D = 740 400f** D : S_p = 417f9 D : W = 49f4 D : Q = 75f6
Marne − 6m10 Pression maxima : 5k *Fouille boisée*	Fixe Montants et contrefiches *Sapin* *Pièces fatiguées en chêne et mélèze* Vérins à vis	9 *24cm* 2m10 *120mm*	680mc 3000k 55530f	0mc55 2k4 44f6	A pleine épaisseur	Voûtes d'évidement construites *42 jours* 25 juin	t_c = 45mm t'_v { 35mm / 37mm	PT[1] 1930mc B[1] 8145mc Q = 10075mc Q : S_p = 5mc48 Q : W = 0mc55 — Fondations / Élévation / Ensemble D: 182921f / 689601f / 872522f D : S_p: 96f6 / 364f3 / 460f9 D : W: 9f7 / 36f5 / 46f2 D : Q: » / » / 84f1

Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS TOURNANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A[1] r^{te} (⩾ 40^m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR LE DANUBE, A INZIGKOFEN[1] *(ALLEMAGNE, - Hohenzollern)*

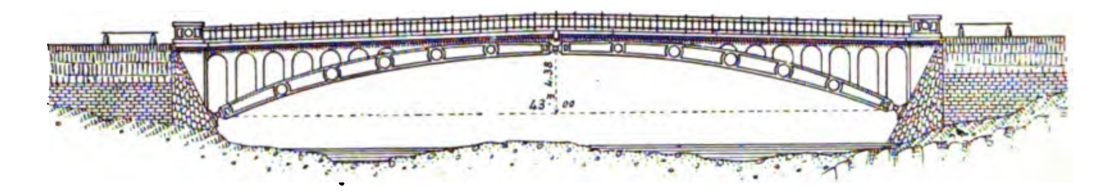
1895 A[1] r^{te} (⩾ 40^m)[1]

Φ$_1$ — amont (S$_4$)

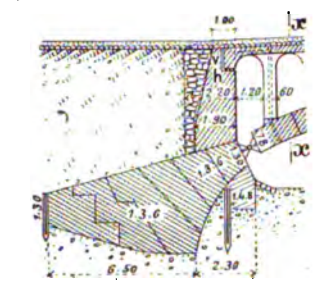


1. — à 6^{km} en amont de Sigmaringen.

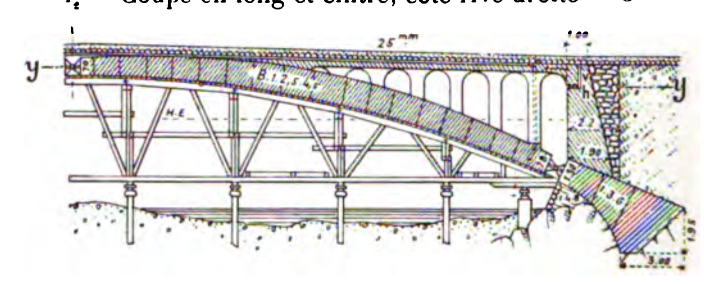
f₁ — Élévation — 2mm



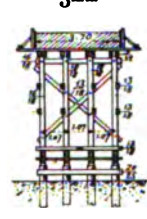
f₃ — Culée rive gauche — 3mm



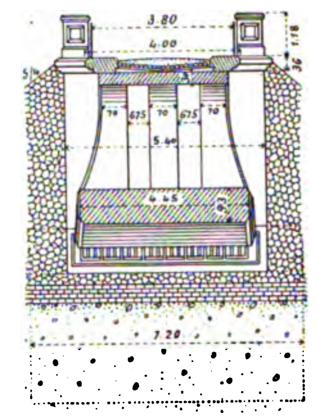
f₂ — Coupe en long et cintre, côté rive droite — 3mm



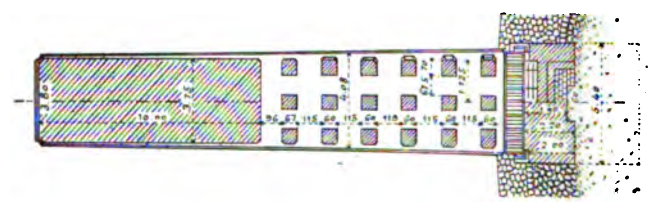
f₄ — Coupe en travers du cintre 3mm



f₅ — Coupe en travers sur *xx* de f₃ — 5mm



f₆ — Coupe horizontale sur *yy* de f₂ — 3mm



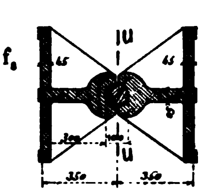
f₇ — Coupe le long de l'extrados

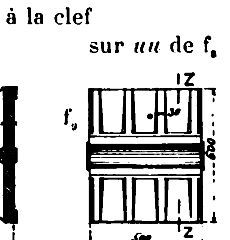
Rotules

Coupes — 3cm

à la clef

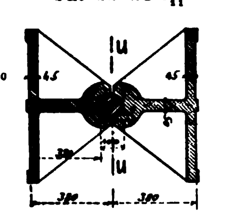
sur *zz* de f₉ — sur *uu* de f₈





aux retombées

sur *zz* de f₁₁ — sur *uu* de f₁₀



1. Le pont est en béton.

— La voûte est un arc en béton à culées perdues, à 3 rotules découvertes, en fonte.

On a tout fait en béton par économie : on avait, à portée, du gravier, du sable, des cailloux, d'excellent ciment.

On voit de suite que c'est un pont moulé : pas de lits, pas de joints ; aux têtes, des ornements comme de métal coulé, des arêtes chanfreinées. On dirait d'un arc en fonte.

2. Joints de dilatation (f_1, f_1).

— On a ménagé, au niveau des naissances des dernières voûtes d'élégissement, un joint vide, d'abord horizontal *h* glissant sur des rouleaux (S_1), puis vertical *v* jusqu'à la chaussée.

Si les voûtes extrêmes ne portaient plus sur les rouleaux de *h*, elles seraient tenues par 4 rails de 0^m90.

Le garde-corps en fer est coupé à la clef.

Au-dessus de la clef, la chaussée est soutenue par des fers Zorès.

3. Écoulement des eaux.

— La chape est en feutre asphalté de 6^{mm}.

Un fer Zorès dans l'axe du pont conduit l'eau à des gargouilles traversant la voûte près des retombées (f_1, f_1).

4. Chaussée.

— Sur la chape, on a étalé successivement 10^{cm} de sable ; puis l'empierrement qui a 6^{cm} aux bords, 10^{cm} au milieu ; puis 8^{cm} de gravier ; enfin, une mince couche de sable.

5. Matériaux.

A. - Ciment.

Durée de la prise : 7 h.

Finesse de mouture : résidu de 1 °/₀ au tamis de 900 mailles par $\overline{0^m01^2}$, - de 18 °/₀ au tamis de 5000 mailles.

Résistance à la traction (mortier à 1 pour 3 de sable normal) :

à 7 jours....................	18^k8
à 28 jours....................	23^k5

B. - Sable.

Par rapport au sable normal, il avait :

42 °/₀ de grains plus fins,
42 °/₀ de grains plus gros,
16 °/₀ de grains de même grosseur.

Avec ce sable, le mortier était de 20 °/₀ plus résistant qu'avec le sable normal.

C. - *Béton.*

	Composition — Pour 1^v de ciment — Sable (extraits des fouilles du Rheinthalgletscher près de Sigmaringen)	Gravier fin jusqu'à 2^{cm} (extraits des fouilles du Rheinthalgletscher près de Sigmaringen)	Gravier de 1^{cm} à 5^{cm} 37 % de vides (extraits des fouilles du Rheinthalgletscher près de Sigmaringen)	Pierre cassée calcaire de 4 à 6^{cm} 40 % de vides	Densité	Résistance à la rupture (Cubes de 25^{cm} d'arête, prélevés au moment de l'emploi) — Age	Résistance à la rupture — Charge de rupture
Murs en retour des culées	4^v		8^v				
Fondation de la culée rive gauche (avec 1/4 de blocs calcaires, gros comme le poing)	3^v		6^v		2320k	213j	198k
Culée rive droite, piliers et voûtes d'élégissement	3^v		6^v				
Grande voûte — Corps	2^v5	0^v5		4^v	2290k	160j	181k
					Pendant la confection et le durcissement des cubes, il faisait très chaud		
Grande voûte — Au voisinage des rotules	2^v	0^v5		2^v5			
Grande voûte — Au contact des rotules	1^v5	0^v75		0^v75	2250k	160j	259k
Plate-forme supportant la chaussée	2^v5	0^v5		4^v			
Tous les parements vus (le ciment était coloré avec 6 % d'ocre jaune)	2^v						
Dalles des trottoirs	2^v		3^v				

Le béton était fait à bras. On variait la quantité d'eau suivant la température (elle a atteint 50°).

6. Calculs.

*A. - **Hypothèses.*** — On a admis comme surcharge roulante une foule pesant 400k m. q. et un rouleau à vapeur de 15^T, ayant 2^m de largeur et 2^m775 entre essieux.

*B. - **Résultats.*** — *B_1. - Courbes de pression.* — On obtient la même courbe de pression, soit en plaçant le rouleau à vapeur dans la position la plus défavorable, soit en étalant sur une demi-voûte une surcharge double.

B_2. - Efforts.

		Pressions maxima	Pressions minima	Tension
dans la voûte	à la clef (appui des rotules)	43k9		
	aux joints de rupture	37k7		1k
	aux retombées (appui des rotules) — sans vent	32k5		
	aux retombées (appui des rotules) — avec vent	42k9		
sur le sol de fondation	rive gauche (gravier)	3k7	2k1	
	rive droite (rocher)	7k7	5k3	

La culée rive droite a une fois 1/2 la largeur de la voûte à la clef; la culée rive gauche, deux fois.

7. Cintre. — L'espacement des fermes augmentait vers les retombées à cause du fruit.

Le platelage de 6^{cm} débordait pour recevoir les cloisons de tête (f_4).

Les boîtes à sable portaient des coins, avec lesquels on mettait le cintre au niveau voulu.

8. Fondation de la culée rive gauche. — Le fond de la fouille a été soumis à une charge d'épreuve de $3^{k}6$, au moyen de plaques de fonte de $22^c \times 22^c$. Le tassement du gravier fut de 6^{mm} ; il n'augmenta pas en 18 heures.

Le béton, posé à sec, était pilonné par couches horizontales de 15^{cm} au plus, derrière des cloisons sensiblement normales à la courbe de pression (f_2, f_3).

9. Exécution de la voûte. — Pendant la construction, les coussinets de chaque articulation étaient solidarisés par des boulons, qu'on enleva avant le décintrement.

Les rotules de clef ont été posées sur le platelage ; celles des reins étaient maintenues par des triangles de bois (f_2).

On chargea d'abord de 40 tonnes le cerveau du cintre sur 6^m de long et 3^m de large.

Puis on bétonna, des naissances vers la clef, en ménageant des vides de 25^{cm} derrière les rotules, de 1^m à 1^m20 aux joints de rupture.

En même temps, on enlevait la charge placée au cerveau.

On pilonnait le béton par minces couches horizontales derrière des cloisons transversales en planches, normales à la courbe de pression, et disposées à 1^m ou 1^m30 de distance.

Les cloisons de tête étaient recouvertes de papier fort ; leurs joints avaient été bouchés au plâtre. On y fixait les liteaux et les moules des têtes.

Le crépi de parement était fait avec la voûte.

Le platelage n'était raboté que sur 0^m20 à partir des têtes. Deux liteaux de 2^{cm} d'épaisseur limitaient cette zône.

On clava aux naissances, à la clef, puis aux joints de rupture.

On avait bétonné la voûte en une semaine, soit 36^{mc} par jour.

On y avait employé 11 hommes : 5 pour faire le béton, 3 pour le transporter, 3 pour le pilonner.

10. Décintrement. — On abaissa le sable de 1^{cm} à partir des culées : la clef remonta d'abord de $2^{mm}5$, puis descendit de 5^{mm} ; la voûte se détacha à partir des retombées.

Un nouvel abaissement de 1^{cm} de toutes les boîtes décolla toute la voûte. La clef tassa encore de $2^{mm}5$ à l'amont, de $2^{mm}7$ à l'aval.

Le décintrement dura 25 minutes.

11. Tassements de la clef.

Dates		Phases de la construction	*Température moyenne en degrés Centigrades*	Abaissements en *mm* totaux amont	totaux aval	partiels amont	partiels aval
1895							
Août	15	Achèvement du cintre..................	*15°*	»	»		
	29	Commencement de la voûte (après chargement du cintre)..................	*17°*	12	9		
Septembre	7	Clavage..............................	*20°*	*a)*35	*a)*34	23	25
	12	....	*15°*	49	43	14	9
Octobre	12	Avant décintrement..................	*6°*	49	43	0	0
	12	Après décintrement..................	*6°*	56.5	50.7	7.5	7.7
	18	....	*3°*	60.5	55.2	4	4.5
	24	....	*6°*	65.6	60	5.1	4.8
	31	....	*0°*	69	62.5	3.4	2.5
Novembre	4	....	*6°*	70	63	1	0.5
	8	....	*12°*	71	65	1	2
	15	....	*6°*	74	70	3	5
	29	....	- *1°*	80	76	6	6
1896							
Janvier	8	....	- *3°*	*b)*83	*b)*80	3	4
Février	10	....	+ *2°*	83	80	0	0

		amont	aval
Tassement total depuis le clavage jusqu'au 8 janvier 1896.	brut, *(b-a)*..........................	48mm	46mm
	en tenant compte de l'abaissement de température de 20° à - 3°.............	33mm	31mm [2]

12. Épreuves.

— Elles furent faites le 1er novembre 1895, 8 semaines après le clavage.

	Mouvements de la clef en *mm* pendant l'épreuve: Relèvement ↑		Tassement ↓		permanent ↓
Rouleau vide, 3T 5..........................	0mm1	rouleau sur le 1er 1/3 de la voûte	0mm6	au passage sur la clef	0mm1
Rouleau plein, 6T 5 (2 passages).........	0 1	»	0 9	id.	»
Charge uniforme de 300k/m. q..........	»	»	0 6	»	»

2. — Au tassement moyen $\mathbf{t} = \frac{33^{mm} + 31^{mm}}{2} = 32^{mm}$ correspondrait un raccourcissement c de l'arc, donné par cette formule :

$$\mathbf{t} = \frac{c \times (2a') \text{ (portée entre articulations)}}{4\ b' \text{ (montée entre articulations)}} \qquad (S_1)$$

d'où :

$$c = 13^{mm}03$$

13. Dates.

		1895
Commencement des travaux		8 juillet
Grande voûte..	Commencement	29 août
	Dernier clavage (joints de rupture)	7 septembre
	Décintrement	12 octobre
Achèvement des travaux		8 novembre
Ouverture à la circulation		12 novembre

14. Quantités.

Béton.	Culées	262^{mc}	634^{mc}
	Voûte	164	
	Piliers	33	
	Plate-forme	40	
	Trottoirs	27	
	Parapets	6	
	Murs en retour	84	
	Remplissage	18	
Fonte pour rotules			15^T
Fer pour garde-corps			2^T

15. Personnel.

Ingénieur. — *Projet et Direction générale des Travaux :* M. Max Leibbrand, « Landesbaurath » à Sigmaringen.

Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

Directeur de l'Entreprise : M. Jean Meyer, d'Holzminden.

SOURCES :

S_1. — Zeitschrift für Bauwesen, 1896, p. 279 à 292, Pl. 37 et 38 : « *Donaubrücke bei* « *Inzigkofen in Hohenzollern. — Betonbrücke mit offenen Gelenken* », Sigmaringen, janvier 1896, Max Leibbrand, Landesbaurath.

S_2. — Ce que j'ai vu, — août 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

PONT SUR LE NECKAR, PRÈS DE LA GARE DE NECKARHAUSEN[1]

(ALLEMAGNE – Hohenzollern)

1899-1900 $\overset{\frown}{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m)2

Φ_1 (S_2)



1. Grande voûte. — C'est, comme celle d'Inzigkofen[2], un arc en béton à culées perdues, à 3 articulations apparentes.

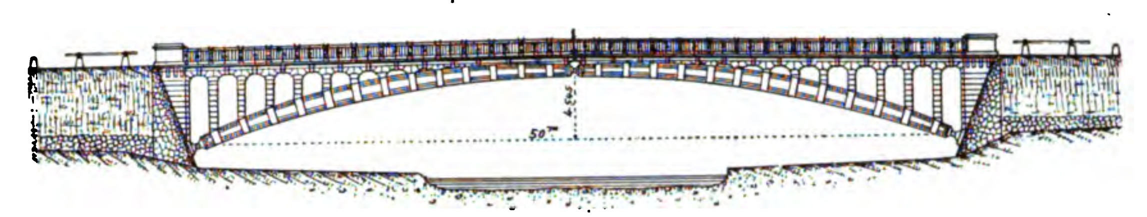
La fibre moyenne est la courbe de pression sous le poids propre du pont : les épaisseurs de la voûte sont calculées pour une pression maxima de 40^k.

La largeur en douelle croît comme les ordonnées d'une parabole, de 4^{m}80 à la clef à 5^{m}60 aux retombées.

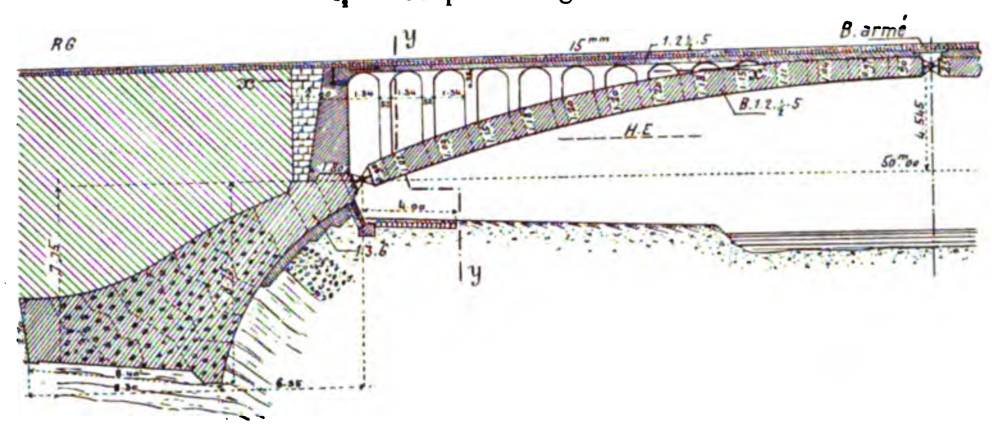
1. — Ligne de Stuttgart à Rottweil, à 73^{km} de Stuttgart.

2. — $\overset{\frown}{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40^m)1, Tome IV, p. 225.

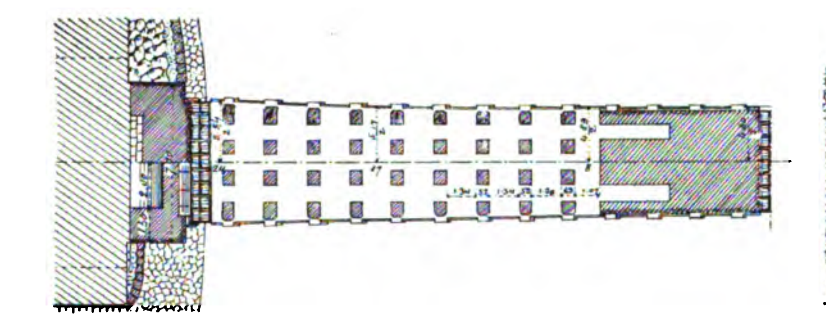
f₁ — Élévation — 2mm



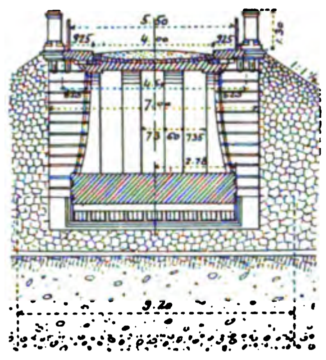
f₂ — Coupe en long — 3mm



f₃ — Coupe horizontale sur *xx* de f₂ — 3mm

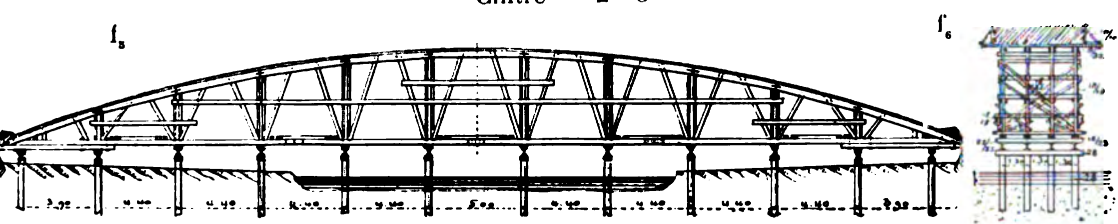


f₄ — Coupe en travers sur *yy* de f₂ — 4mm



Cintre — 2mm5

f₅ f₆



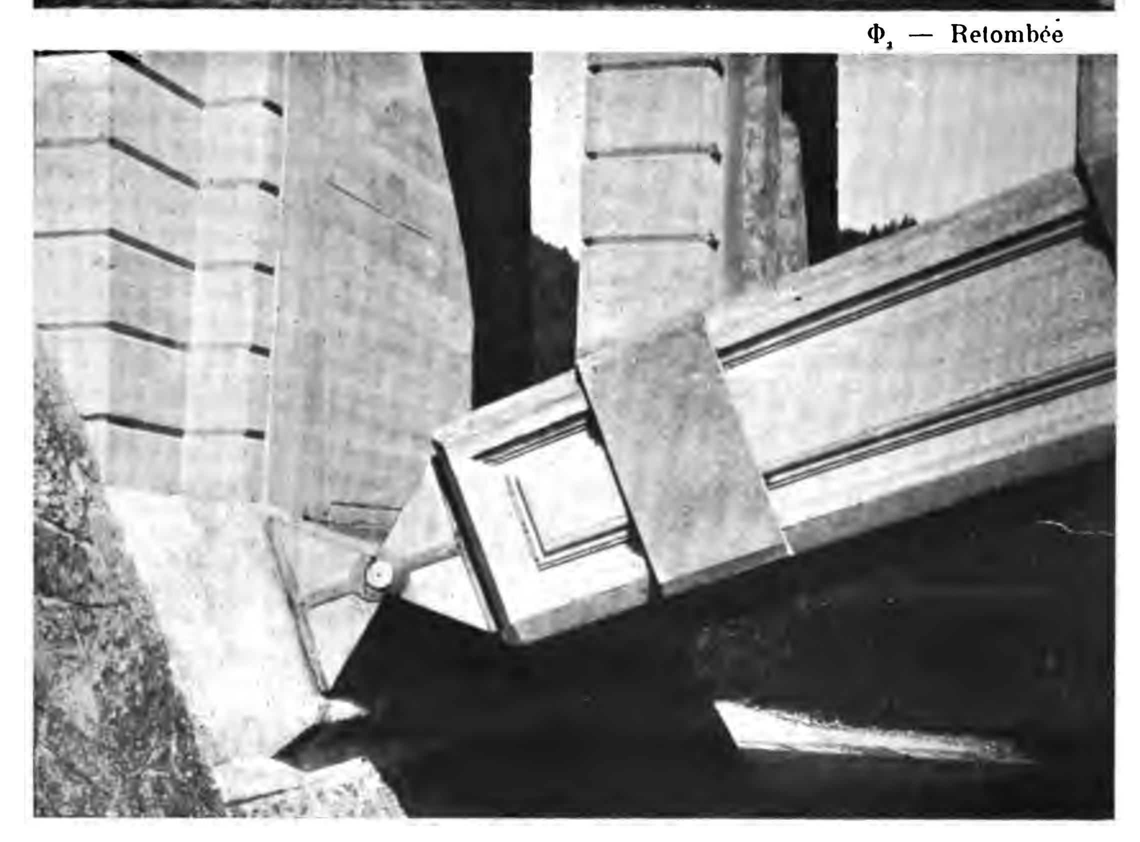


Articulations (S_4)

Φ_2 — Clef



Φ_3 — Retombée



2. Articulations.

Coupes $2^{cm}5$ — f_7 sur zz de f_8 — f_8 sur uu de f_7

3. **Joints de dilatation** (f_1). — Comme au pont d'Inzigkofen[3].

4. Culées. — Le sol de fondation est une marne dolomitique résistant assez à la compression, peu au glissement.

Pour résister au renversement, on met les matériaux en profondeur.

Pour résister au glissement, on ne compte pas seulement sur le frottement proprement dit qui, lui, ne dépend que du poids de la culée et non de sa forme, mais, comme on l'a constaté sur un modèle en petit, sur une sorte de bourrelet qui butte le pied de la culée et augmente avec sa largeur : on l'a portée à 9^m20 pour une largeur à la clef de 4^m80.

5. Matériaux. — *A. - Ciment.* — Le ciment lent laissait un résidu de 1/1000 sur le tamis de 900 mailles, de 130/1000 sur le tamis de 4900 mailles.

B. - Mortier. — Voici le résultat des expériences faites au Laboratoire d'Essai de l'Ecole Polytechnique de Stuttgart, par M. le Directeur von Bach :

Nombre de jours de prise	Résistance du mortier à 1/3 — à la traction — Sable normal	Porphyre broyé	Calcaire broyé	à la compression (Cubes de 7^{cm} d'arête, à 10 °/$_o$ d'eau) — Sable normal	Porphyre broyé
7 j	21^k2	31^k5	»	218^k2	208^k8
8	22,1	35,3	»	»	»
14	»	35,2	32^k4	»	»
28	24,9	36,0	36,6	»	»
56	26,0	»	40,9	»	»
90	29,1	42,0	»	»	»

Le sable de broyage contient jusqu'à 1/4 de son volume de poussière. D'après les essais que voici, faits à l'usine de Blaubeuren, elle ne diminue pas la résistance :

Nombre de jours de prise	Résistance moyenne (Mortier à 1/3 de porphyre broyé) — à la traction — Sable lavé	Sable non lavé	à la compression (Cubes de 5^{cm} d'arête) — Sable lavé	Sable non lavé
7 j	33^k1	33^k4	162^k	162^k
14	»	36,6	»	189
28	40,0	40,2	222	211
90	»	48,9	»	»

3. — A[1] rte (≥ 40m)1, Tome IV, p. 225.

C. - *Béton* (*Dosages*).

	Pour 1v de ciment		
	Sable	Gravier	Pierre cassée
Massif des fondations	3v	6v	»
Voûte	2v5	»	5v
Tablier sous chaussée	2v5	»	5v
Piliers des voûtes d'élégissement, murs en retour	3v	»	6v
Parements de tête	4v	»	»
Blocs moulés (plinthes, consoles, parapets)	2v	»	4v

On a employé 300 tonnes de ciment pour 1440mc de béton, soit en moyenne 208k de ciment par m. c. de béton en œuvre.

6. Efforts, en Kg/0m01².

A. - Dans la voûte. — Pas de tension.

La compression varie entre 38k2 et 39k8, sauf sous les balanciers de fonte ; elle atteint là :

	à la clef	aux retombées
sans tenir compte du frottement des tourillons	54k6	46k2
en tenant compte de ce frottement, avec $f = 0{,}4$	64k	57k8

Les moments de flexion dans la voûte, dûs au frottement des tourillons, sont : positifs maxima à la clef; négatifs maxima aux retombées; nuls aux joints de rupture.

B. - Dans les articulations. — Le travail maximum des balanciers à la flexion est :

Tension 221k3
Compression 346k

Cette fonte résiste à 1735k à la traction.

C. - *Dans les culées.*

	Pression maxima		Coefficient de frottement sur la base	
	Rive droite	Rive gauche	Rive droite	Rive gauche
Poids mort et crues	5k5	4k4	0,41	0,42
Surcharge complète	5,6	4,6	0,23	0,28
Ensemble	11k1	9k0		

7. Cintre. — Pendant le bétonnage, les vérins se sont enfoncés de 3cm dans leurs semelles. La pression par 0m01² était alors : sur les semelles inférieures, 80k ; sur les supérieures, 45k.

Pour les sauver, on a installé à côté des vérins, alors que la voûte était aux 2/3 bétonnée, des billots de bois qui arrêtèrent le tassement.

Au moment de décintrer, on les scia.

8. Fondations. — Le béton, fait à la machine, était pilonné par couches horizontales de 10cm à 15cm, derrière des cloisons normales à la courbe de pression : on les enlevait dès que le béton avait fait prise.

On posait 45mc à 75mc de béton par jour.

9. Exécution de la voûte. — On bétonna, à partir de la clef, par tranches symétriques, d'abord les tranches sous les piliers des voûtes d'élégissement.

Le béton des têtes était fait de pierres de différentes couleurs : on le pilonnait en même temps que le corps de la voûte, derrière des cloisons rabotées et huilées.

La voûte (270mc) fut faite en 9 jours.

On clava d'abord aux articulations, puis aux joints de rupture.

On enleva les cloisons de tête 24 heures après le clavage. Les têtes furent vigoureusement lavées à la brosse : on put ainsi donner aux parements le grain de la pierre.

10. Décintrement. — On décintra 8 semaines après le clavage, après avoir posé les modillons et le couronnement qui est en béton moulé.

On tourna deux fois les vérins, en allant de la clef aux retombées, d'abord d'un 1/4 de tour, puis d'un 1/2 tour.

Il n'y a pas eu, aux retombées, de mouvements appréciables.

11. Tassements de la clef, en *mm.*

	Amont (Nord)		Aval (Sud)	
	Totaux	*Différences*	Totaux	*Différences*
1900				
25 juin (commencement du bétonnage de la voûte)...	0		0	
		57mm1		*67mm8*
3 juillet (clavage)........	57mm1		67mm8	
		9.6		*10.3*
28 août (décintrement) matin..........	66.7		78.1	
		12.1		*12.5*
28 août (décintrement) soir..........	78.8		90.6	
1901		*26.9*		*31.3*
1er avril..........	105.7		121.9	
		−13		*−13*
3 juin..........	92.7		108.9	
1902		*20*		*29*
30 janvier..........	112.7		137.9	
		−16		*−13*
21 mai..........	96.7		124.9	

12. Épreuves. — Au passage d'un rouleau de 6T5, en octobre 1900, - de 16T, en mai 1901, - la voûte fléchit de moins de 1mm, puis revint à sa place.

13. Dates.

Projet..........	1896
Fondations..........	automne 1899 (durée 3 mois)
Ouverture à la circulation..........	23 octobre 1900

14. Quantités et Dépenses.

	Quantités	Dépenses totales	Dépenses par unité (m. c. ou 100k)
Fondations (béton des culées)	850mc	26.420f	31f08
Élévation (béton damé)	530mc	20.419f	38f52
Béton moulé	60mc	4.363f	72f71
Cloisons de tête		2.680f	
Cintre		6.125f	
Articulations (pose comprise)		6.848f	33f32
Garde-corps	4700k	2.964f	63f06
Asphalte. — Fers		1.571f	
Pont proprement dit		71.390f	
Accessoires. — Pont de service		9.426f	
Projet. — Direction des Travaux		5.984f	
Dépense totale		86.800f	

15. Personnel.

Directeur Général, *Projet et Exécution :* M. Max Leibbrand, « Landesbaurat » à Sigmaringen.

Ingénieurs (Regierungs-Baumeister) :

Projet : MM. Karl Bossert et Adolf Göller.

Vérification des Calculs, Direction des Travaux : M. Friedrich Probst.

Entrepreneurs : MM. Waiss et Freytag, de Neustadt-sur-Haardt.

Directeur de l'Entreprise : M. Rössle, « Regierungs-Baumeister ».

SOURCES :

S_1. — Zeitschrift für Bauwesen, 1903, p. 455 à 476, Pl. 54 et 55 : « *Die Neckarbrücke bei « Neckarhausen (Hohenzollern)* », Max Leibbrand, Landesbaurat à Sigmaringen, 20 août 1902.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1908.

PONT DU PRINCE-RÉGENT

SUR L'ISAR, A MUNICH *(BAVIÈRE)*

Prinzregenten Strasse

1900–1901 $\mathbf{A}^1$ r^te^ ($\geqslant$ 40^m)3

Φ_1 (S_2)



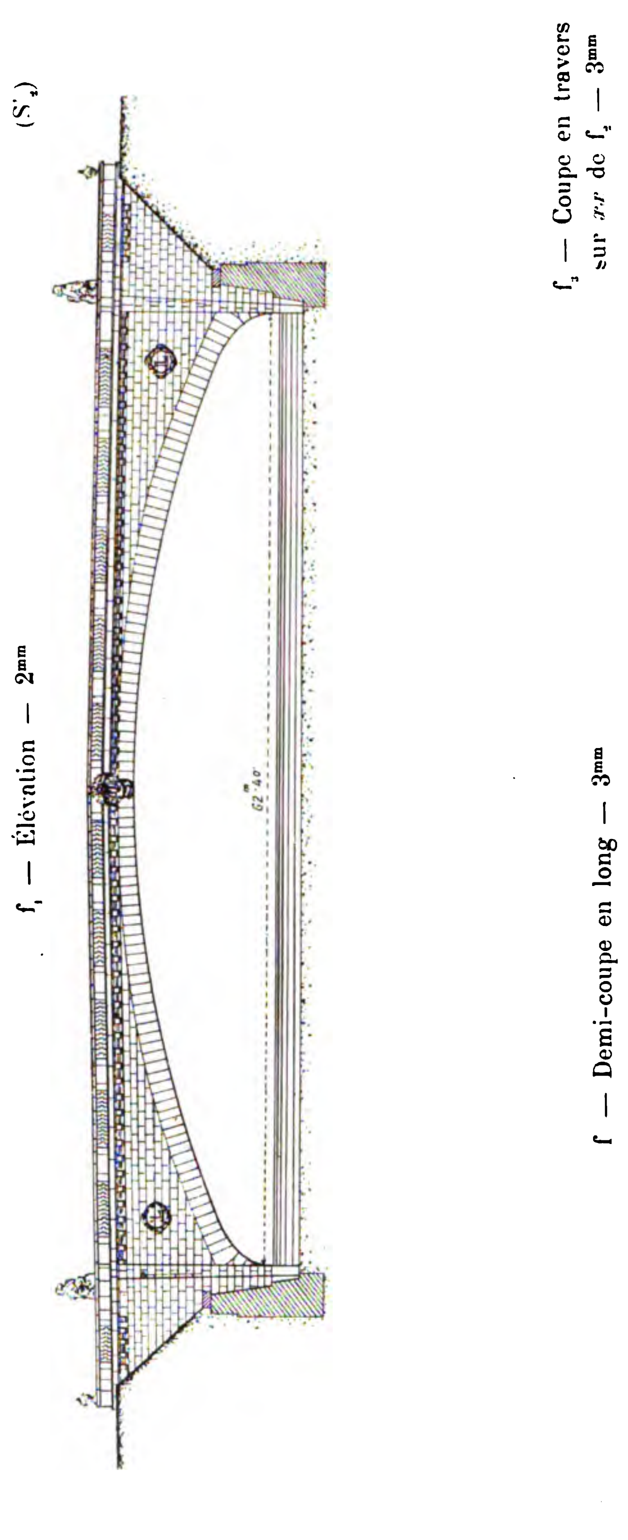
1. Aspect. — La voûte est jetée entre deux grands terre-pleins; elle conduit au monument de la Paix, élevé sur la rive droite de l'Isar.

Le Pont devait être, et a été, traité avec luxe.

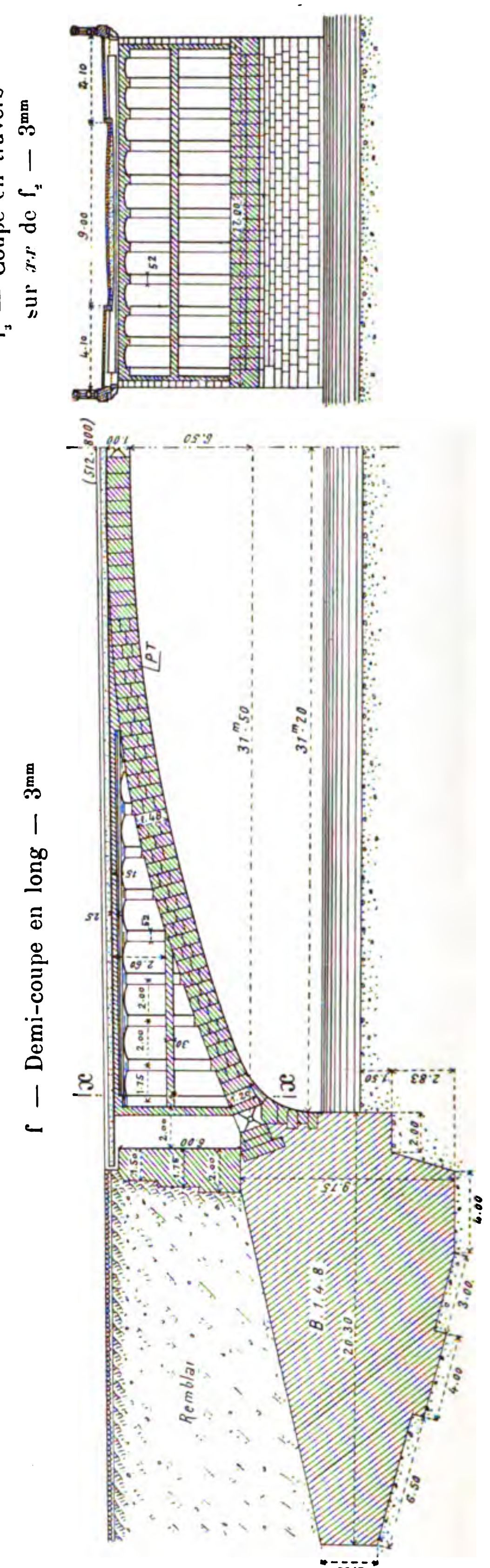
2. Culées. — La courbe de pression coupe la base dans le 1/3 central, sous un angle de 72°.

Les culées sont de 20^m plus larges que le pont.

(S'₄)



f_1 — Élévation — 2^{mm}



f_2 — Coupe en travers sur xx' de f_1 — 3^{mm}

f — Demi-coupe en long — 3^{mm}

Articulation de clef, masquée ensuite (S_1)

Φ₁ — Vue de côté



Φ₂ — Vue par-dessus



3. Fondations. — La marne[1] avait été reconnue par des sondages poussés à 27m.

On déblaya dans chaque fouille 10.000mc.

Le béton à 1v-4v-8v (S''_2), posé jour et nuit sans interruption, était pilonné par minces couches, normales à la courbe de pression.

En 9 à 10 jours, on bétonna les deux culées (5400mc environ).

4. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.

Collaborateurs techniques : MM. Bernard Wœrner et Jean Grüb, Ingénieurs.

Direction des Travaux : M. H. Sœrgel, Ingénieur en chef au Ministère de l'Intérieur ; — M. Jules Klein, Ingénieur.

Architecture : M. le Professeur Théodore Fischer.

1. — « *Merglicher Flinz* ».

SOURCES :

S_1. — Album publié par MM. Sager et Wœrner : « *Prinzregenten Brücke, - München* ».

S_2. — Dessins d'exécution (S'_2) et renseignements (S''_2) que m'ont gracieusement communiqués MM. Sager et Wœrner.

S_3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_2 ou S_3 est de S_1.

PONT MAX-JOSEPH, SUR L'ISAR, A MUNICH

Entre le Jardin anglais et le Faubourg de Bogenhausen

1901-1902 $\underset{\circ\circ\circ}{\overset{\frown}{A}}{}^{1}$ r^te^ ($\geqslant$ 40^{m})^{4}

Φ_1 (S_1)



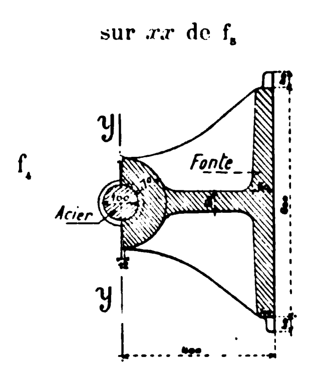
1. Matériaux. — La grande voûte et les têtes sont en pierre de taille; le reste, en béton de gravier (S''_2).

2. Articulations (S'_1).

Coupes — 5^{cm}

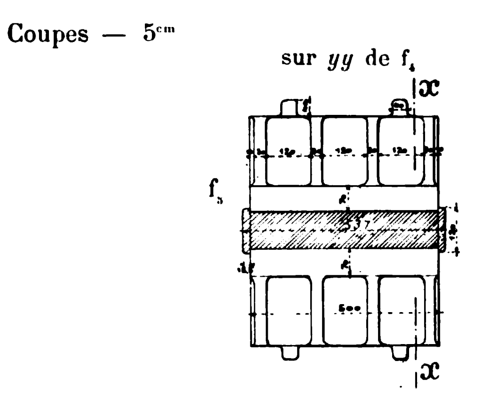
sur xx de f_5

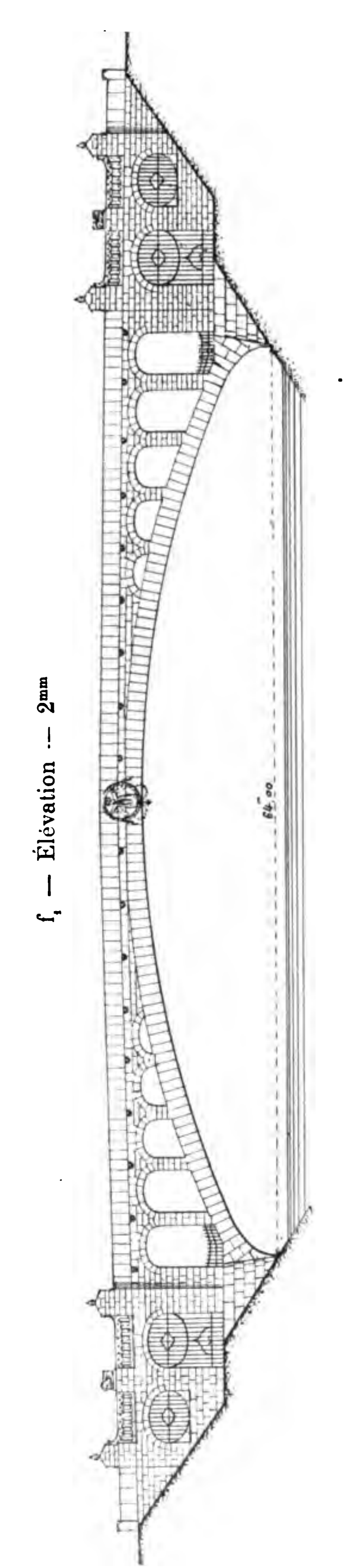
f_4



sur yy de f_4

f_5



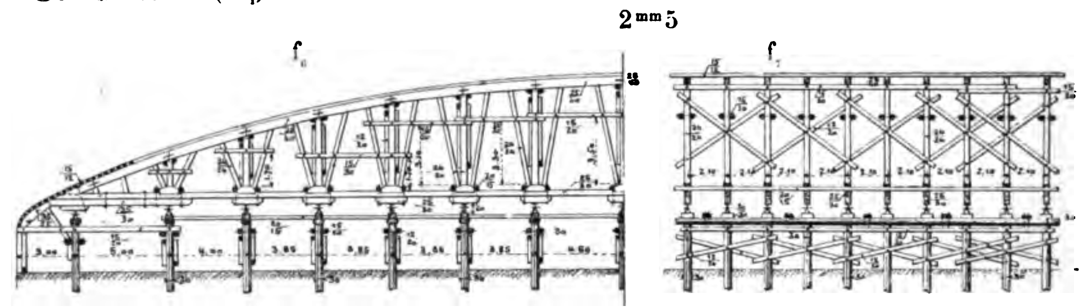


f₁ — Élévation — 2mm

f₂ — Demi-coupe en long — 3mm

f₃ — Coupe en travers sur zz de f₂ — 3mm

3. Cintre (S'₁).



4. Ouvriers. — On y a occupé jusqu'à 600 ouvriers (S₃).

5. Dates (S"₁, S"₂).

Commencement des travaux	4 novembre 1901
Fondations	décembre 1901 - mars 1902
Grande voûte	24 avril - 14 mai 1902
Ouverture à la circulation	août 1902

6. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. Sager et Wœrner, de Munich.
Direction des Travaux : M. Schwiening, Directeur des Travaux de la Ville.

SOURCES :

S_1. — Dessins (S'_1) et renseignements (S''_1) gracieusement communiqués par M. Schwiening.

S_2. — Dessins d'exécution (S'_2) et renseignements (S''_2) qu'ont bien voulu me donner MM. Sager et Wœrner.

S_3. — Centralblatt der Bauverwaltung, 30 août 1902, p. 427 : « *Die Max-Joseph Brücke* « *in München* » A. Kling.

S_4. — Ce que j'ai vu — août 1908.

TABLEAU SYNOPTIQUE GÉNÉRAL

DES PONTS AYANT DES VOÛTES ⩾ 40^{M}

SEMI-ARTICULÉES

OU

ARTICULÉES

CLASSÉS PAR :

TYPE ET MATIÈRE DES ARTICULATIONS,
INTRADOS, NOMBRE D'ARCHES, VOIE PORTÉE,
MATÉRIAUX DES VOÛTES

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES[1] ⩾ 40ᵐ

Toutes ces voûtes sont à ciment.

Après la date on a indiqué la portée entre culées, puis, *en italique*, entre ( ), la portée entre rotules.

	ARCS TRÈS SURBAISSÉS				Plus grande portée		Nomb[...]	
	UNE SEULE GRANDE ARCHE			PLUSIEURS Gdes ARCHES				
	SOUS ROUTE A¹ rte		SOUS CHin DE FER A VOIE NORMALE A¹ Fr	SOUS ROUTE An rte	totale	entre articulations	d'ouvrages	[illegible]
	EN BÉTON	EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE	EN PIERRE DE TAILLE	EN BÉTON				
ARTICULATIONS — **SUR PLOMB**		**Höfen** [2] 1885 - **41ᵐ** - *(28ᵐ)* **Marbach** [3] $18\frac{86}{87}$ - **43ᵐ50** - *(32ᵐ)* **Baiersbronn** [2] 1889 - **40ᵐ** - *(33ᵐ)*			**43ᵐ50**	*33ᵐ*	3	[illegible]
ARTICULATIONS — **A GENOU** Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle	**Munderkingen** 1893 - **59ᵐ** - *(50ᵐ)*		**Morbegno** $19\frac{02}{03}$ - **70ᵐ** - *(66ᵐ)*	**Coulouvrenière** $18\frac{95}{96}$ - **2 × 40ᵐ** - *(40ᵐ)*	**70ᵐ**	*66ᵐ*	3	[illegible]
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN **PIERRE**								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN **PIERRE**								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN **BÉTON MOULÉ**								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN **BÉTON ARMÉ**								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN **ACIER** — Rotules d'acier prises dans des sabots en fonte								
ARTICULATIONS — ROULANTES — EN **ACIER** — Rotules tout entières en acier moulé								
ARTICULATIONS — **TOURNANTES**								
Plus grande portée — totale	**59ᵐ** (Munderkingen)	**43ᵐ50** (Marbach)	**70ᵐ** (Morbegno)	**40ᵐ** (Coulouvrenière)	**70ᵐ**			
Plus grande portée — entre articulations	*50ᵐ* (Munderkingen)	*33ᵐ* (Baiersbronn)	*66ᵐ* (Morbegno)	*40ᵐ* (Coulouvrenière)		*66ᵐ*		
Nombre — d'ouvrages	1	3	1	1			6	
Nombre — de voûtes ⩾ 40ᵐ	1	3	1	2				7

1. — Pour la définition des voûtes semi-articulées, voir Tome IV, Livre I, p. 28. 2. — En PT*. 3. — Bandeaux en PT*, corps en MEV*.

VOÛTES ARTICULÉES ⩾ 40m

ELLIPSES E	ARCS PEU SURBAISSÉS A	ARCS ASSEZ SURBAISSÉS A	ARCS TRÈS SURBAISSÉS A					Plus grande portée		Nombre	
PLUSIEURS Gdes ARCHES	UNE SEULE Gde ARCHE	UNE SEULE Gde ARCHE	UNE SEULE GRANDE ARCHE			PLUSIEURS Gdes ARCHES					
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE		SOUS ROUTE	SOUS ROUTE A1 rte		SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE	SOUS ROUTE An rte					
En Fr EN BÉTON	A1 Fr EN BÉTON	A1 rte EN BÉTON	EN BÉTON	EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE	A1 Fr EN BÉTON	EN BÉTON	EN PIERRE DE TAILLE	totale	entre articulations	d'ouvrages	de voûtes ⩾ 40m
Garching 19 07/08 44m35 - (38m55)								44m35 Garching	38m55	1	1
Chemnitz 1898/1900 - 43m10			Grasdorf 1899/1900 40m - (40m39)	Göhren [4] 19 03/04 60m - (60m56)		Hochberg 19 01/03 2 × 39m40 - (40m)		60m Göhren	60m56	4	5
						Neckargartach 19 03/05 5 × 40m - (40m)		40m Neckargartach	40m	1	5
						Malling 1899/1901 - 3 × 40m (40m50), Moulins-lez-Metz 19 04/05 - 2 × 40m - 44m (40m54) (44m70)		44m Moulins-lez-Metz	44m70	2	6
		Gräveneck 19 11/12 - 48m (48m425)						48m Gräveneck	48m425	1	1
			Élise [6] 19 06/07 47m50 - (43m50)			Reichenbach [6] 19 02/03 - 44m - (41m) Wittelsbach [6] 19 04/05 - 44m - (41m)	Cornélius 19 02/03 - 44m - (41m) Maximilien 19 03/05 - 2 × 45m87 (44m)	47m50 Élise	44m Maximilien	5	6
	Kempten 1906 64m50 - (50m60) 63m80 - (50m60)		Wallstrasse 19 04/05 65m45 - (57m)		Illerbeuren 19 03/04 - 59m (57m164)	Mannheim [6] 19 05/08 - 2 × 59m50 (58m50)		65m45 Wallstrasse	58m50 Mannheim	6	6
			Inzigkofen 1895 - 47m90 - (43m) Neckarhausen 1899/1900 - 59m40 - (50m)	Prince-Régent [5] 19 00/01 - 62m40 - (63m) Max-Joseph [5] 19 01/02 - 64m - (60m)				64m Max-Joseph	63m Prince-Régent	4	4
44m35 / 38m55 Garching	64m50 / 50m60 Kempten	48m / 48m425 Gräveneck	65m45 / 57m Wallstrasse	64m Max-Joseph / 63m Prince-Régent	59m / 57m164 Illerbeuren	59m50 / 58m50 Mannheim	45m87 / 44m Maximilien	65m45 Wallstrasse	63m Prince-Régent		
2	3	1	5	3	1	7	2			24	
2	3	1	5	3	1	16	3				34

- En MOV*. 5. — En PT*. 6. — Bandeaux en PT*; corps en B*. 7. — Bandeaux en MEV*; corps en B*. *. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, p. I, n° 6.

VOÛTE ARTICULÉE

QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉE

DANS LES SÉRIES DU LIVRE II [1]

Comme on l'a fait pour les voûtes inarticulées [2], on décrit sommairement ici une voûte articulée en béton peu armé, qu'on aurait pu chercher dans les séries du Livre II.

1. — La « Revista de Obras Públicas » du 25 avril 1901 décrit un pont en béton à 3 articulations de 50^m de portée, 4^{m}50 de flèche, sur le Río Nalón, pour la route d'Oviedo à Pola de Lena (Asturies), près de la station de Las Segadas, projeté par M. Eugenio Ribera, Ingénieur au Corps des Ponts, Chaussées et Ports.

Ce projet avait été approuvé, mais l'Entrepreneur général de la Route obtint d'y substituer un pont en fer *.

Il a été indiqué comme exécuté dans quelques périodiques techniques.

* Renseignement gracieusement donné par M. Ribera, — mars 1907.

2. — Tome III, p. 283.

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la voie au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la voie portée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons de courbure : à la clef aux naissances*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées	COMMENT SONT ARMÉES LES VOÛTES — ROTULES	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Sigmaringen** *Hohenzollern* 1907-1909 *Arc assez surbaissé, à 3 articulations tournantes, sous chemin de fer à voie normale*	*60m 50* 23mm2 12m53	4m30 à 4m97 *4m 00 à 6m 70 à cause de la courbe* Fruit courbe 0m 725	Courbe d'intrados d'après la courbe de pression Au-dessus des naissances : **41m60** *13m 245* $\frac{1}{3,14} = 0,318$ *28m 40* *9m00* Entre axes des rotules : **32m00** *5m 562* $\frac{1}{5,753} = 0,173$	Corps : **1m25** *1m 25* 1m06 Têtes : **1m20** *1m 20* 1m06	Fers ronds, en long et en travers, au cerveau à l'intrados, aux reins à l'extrados, au-dessous des rotules — Tourillons en acier Diamètre : 55mm Balanciers en fonte Pression maxima : sur les tourillons 585k sur les sommiers en béton 56k	Béton Corps de la voûte : Ciment......... 1v Sable.......... 3v Gravier........ 4v Sommiers des articulations : Ciment......... 1v Sable.......... 1v5 Pierre cassée .. 2v5	Pression avec surcharge : Clef : MAX. 13k8 Joints de rupture : MAX. 23k1 ; moy. 13k2 Retombées : MAX. 10k3 ; moy. 5k9 6200k/1mc¹	1° Plate-forme en béton armé, sur piles en béton de 70c à 90c, espacées de 2m75 à 3m80, traversées par un couloir de 0m80. 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

EN BÉTON PEU ARMÉ

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4].
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0^m01^2 *Procédé*	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	**DÉCINTREMENT** État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	**TASSEMENTS** DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]				
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rive gauche : *Rocher et Gravier* — 4^m75 » —— Rive droite : *Gravier* — 3^m50 *Épuisements dans des batardeaux*	Fixe Montants et contrefiches *Pin* Vérins à vis	4 *22^{cm}* 1^m24 à 2^m08 *80^{mm}*	» 4000^k 14808^f	» 13^k4 49^f6	A pleine épaisseur Tranches isolées de 1^m à 1^m50	Piles sur la voûte construites *2 mois environ* 20 octobre	$t_c = 24^{mm}$ $t'_v = 7^{mm}$ $t''_v = 2^{mm}1$	Q = 1050^{mc} Q : S_p = $3^{mc}49$ Q : W = $0^{mc}29$ D = 92550^f D : S_p = 307^f8 D : W = 25^f2 D : Q = 88^f1

1. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTE ARTICULÉE > 40m EN BÉTON PEU ARMÉ

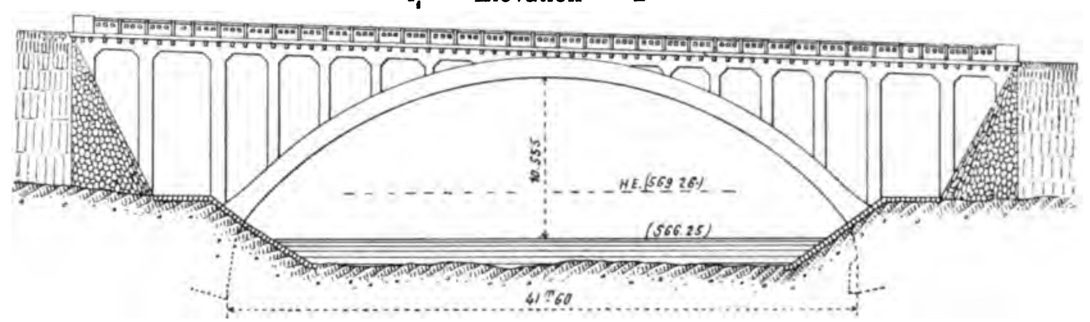
MONOGRAPHIE

PONT SUR LE DANUBE, A SIGMARINGEN *(ALLEMAGNE, - Hohenzollern)*

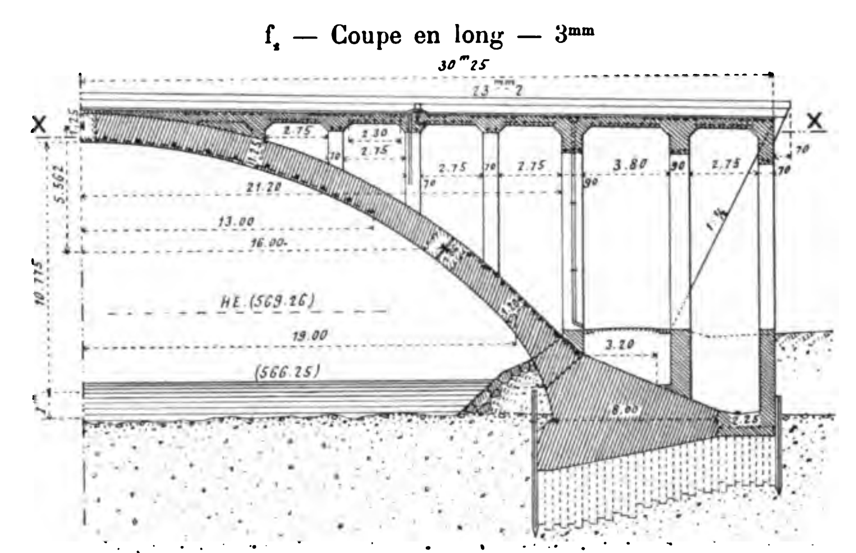
Ligne de Sigmaringen à Gammertingen [1]

1907-1909

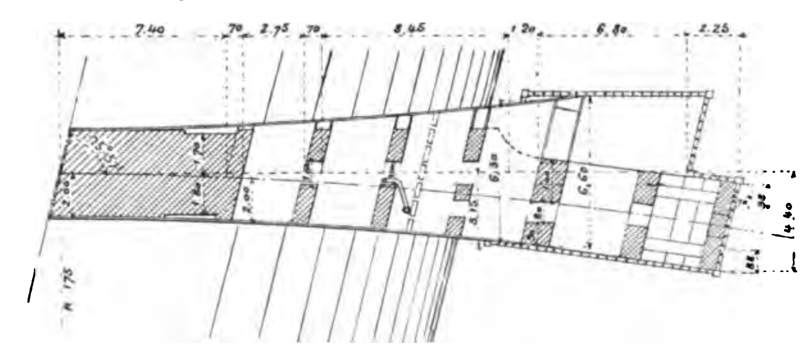
f_1 — Élévation — 2mm



f_2 — Coupe en long — 3mm



f_3 — Coupe horizontale sur xx de f_2 — 3mm



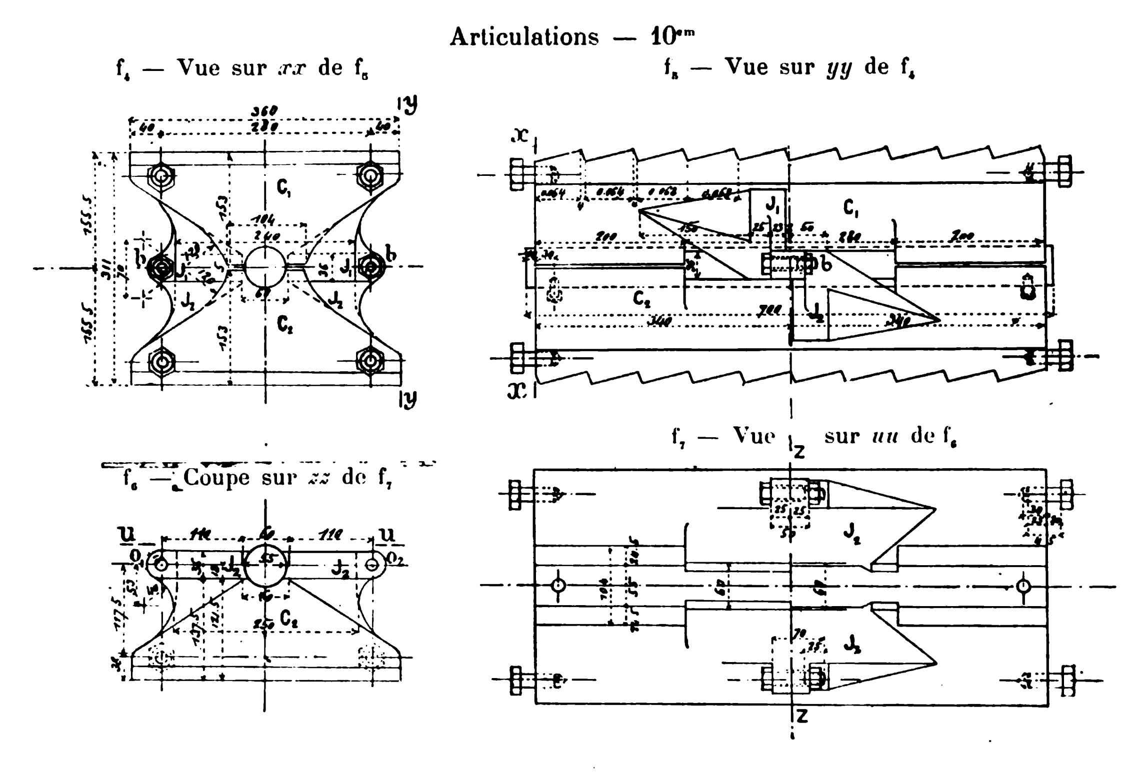
1. Tracé de la voie. — Elle est en rampe de 1/42, en courbe de 175m, à 75° 57' sur le courant.

1. — Au Pt 4H + 61m50.

Φ_1 (S'''_1)



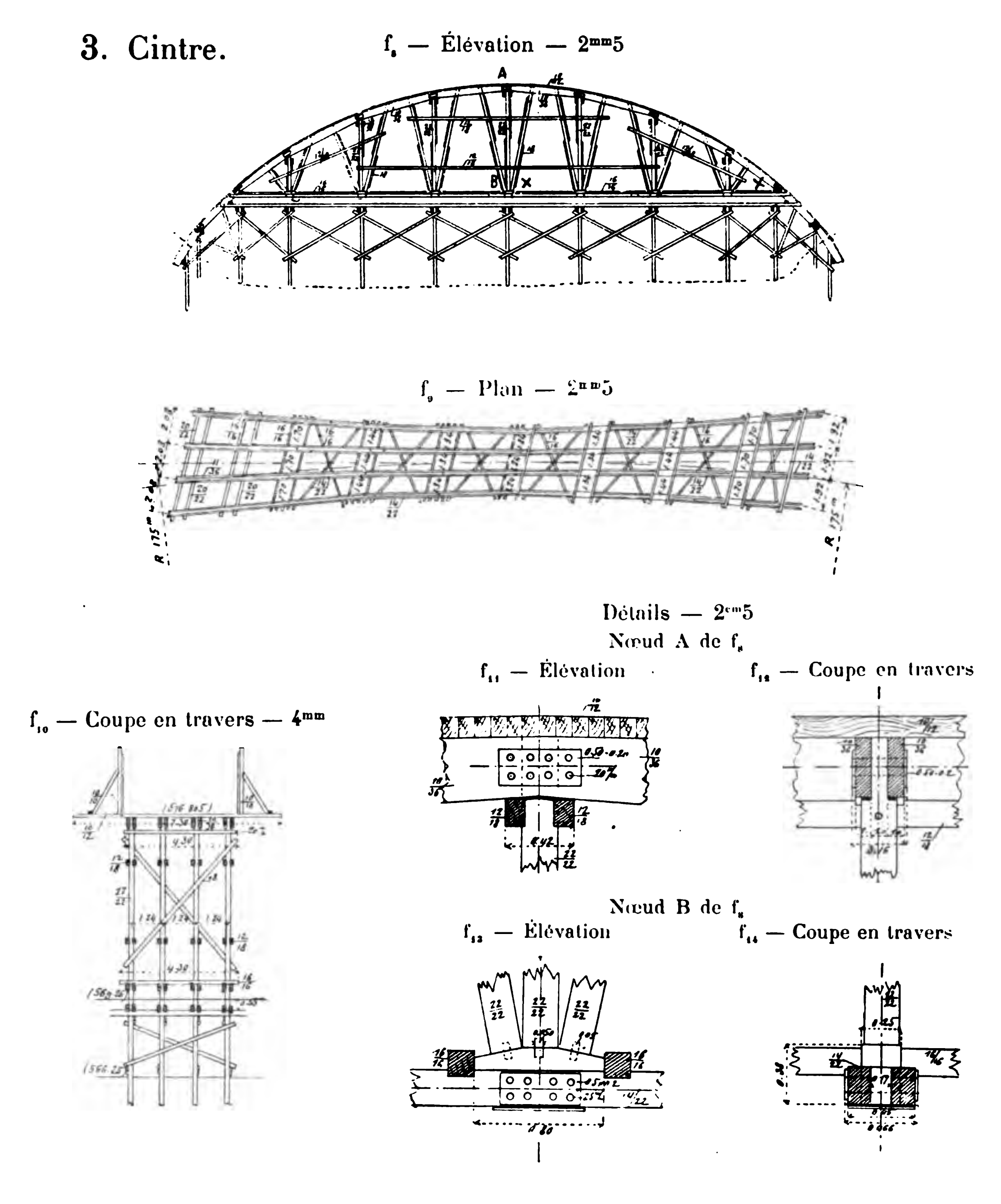
2. Articulations (f_4 à f_7). — Dans ce pont biais, on pouvait craindre un déplacement transversal d'un des deux balanciers C_1, C_2 par rapport à l'autre.



Pour le prévenir, voici l'ingénieux dispositif[2] imaginé par M. Max Leibbrand : Les balanciers portent deux joues J_1, J_2.

Pendant qu'on met en place les rotules, on solidarise les joues en passant les boulons *b* (f_4, f_5) par les trous O_1, O_2 (f_6).

3. Cintre.



2. — Dispositif breveté — M. Leibbrand a bien voulu m'autoriser à le décrire ici.

4. Dates (S"₁).

Culées	automne 1907 printemps 1908
Grande voûte	été 1908
Décintrement	20 octobre 1908
Ouverture à la circulation	printemps 1909

5. Personnel (S"₁).

Projet et Direction des Travaux : M. Max Leibbrand, Geheimer Baurat.
Direction Générale des Travaux : M. Rühle, Regierungsbaumeister ;
M. Leibbrand[3], Geheimer Baurat.
Entreprise : Westdeutsche Eisenbahngesellschaft.

3. — Père de M. Max Leibbrand (S"₁).

SOURCE :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), renseignements (S''_1) et photographie (S'''_1), gracieusement communiqués par M. Max Leibbrand, en 1909.

LIVRE III

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES ARTICULÉES

TITRE I

DISPOSITIONS — DIMENSIONS

AVANTAGES — INCONVÉNIENTS

DE

CHAQUE TYPE D'ARTICULATION

ARTICULATIONS SUR PLOMB

Art. 1. — Épaisseurs et Matériaux des voûtes. — Dimensions et Travail des Bandes de Plomb — TABLEAU SYNOPTIQUE

Date	Ponts (On a souligné ceux sous rails)	Pays	Intrados — Rang dans les séries $\geqslant 40^m$	Voûte — Portée totale $2a$	Entre articulations — Portée $2a_r$	Entre articulations — Surbaissement σ_r	Épaisseurs en 0m01 — à la clef e_0	Épaisseurs — aux joints de rupture e'	Épaisseurs — aux retombées e_1	Matériaux — Bandeaux	Matériaux — Douelle et Queutage	Matériaux — Sommiers	Bandes de plomb — Largeur dans le sens du joint en 0m01 — Clef j_0	Largeur — Retombées j_1	Rapports $\frac{j_0}{e_0}$	Rapports $\frac{j_1}{e_1}$	Épaisseur en 0m01	Pression étalée sur toute la largeur de la bande kg/$\overline{0^m01}^2$
	A. - Voûtes semi-articulées																	
1885	de **Höfen,** sur l'Enz.	Wurtemberg	Â^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)^1	41^m	28^m	1/10	100^{cm}		150^{cm}		PT^1 — Grès		35^{cm}	50^{cm}	*0.35*	*0.33*		60^k
1886	de **Wildbad**[2], sur l'Enz.		»	22.60	15.60	1/4.8	50		80		PT^1 — Grès		20	20	*0.40*	*0.25*	20^{mm}	46
1886	de **Neuneck**[2], sur la Glatt.		»	23	17	1/5.66	40		80		PT^1 — Grès		10	20	*0.25*	*0.25*		36
$18\frac{86}{87}$	de **Marbach,** sur la Murr.		Â^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)^2	43.50	32	1/10.32	120		150	PT^1 Keuper	MEV^1 Muschelkalk	PT^1 Grès	40	50	*0.33*	*0.33*	22^{mm}	55
1889	de **Baiersbronn,** sur la Murg.		Â^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)^3	40	33	1/10	60		80		PT^1 — Grès		17	18	*0.28*	*0.22*		115
1890	de **Baiersbronn**[3], sur la Forbach.		Â^1 r^{te}	32	25	1/8.33	60		80		PT^1 — Grès		11	13	*0.18*	*0.16*		102
1891	d'**Ehingen**[3] (Passage supér^r).		Â^1 r^{te}	23	18	1/5	45		100	PT^1 Calcaire	B^1 - 1^v, 2^v, 6^v	B^1 - 1^v, 2^v, 4^v	10	10	*0.22*	*0.10*		61
1892	de **Rechtenstein**[4], sur le Danube.		Â^2 r^{te}	23	23	1/9.2	65	73	90	PT^1 Calcaire	B^1 - 1^v, 2^{v}5, 5^v + 1/8 pierres	B^1 - 1^v, 2^v, 4^v	18	20	*0.276*	*0.222*		60
1895	de **Mühlheim**[3], sur le Neckar.		Â r^{te}	29.20	22	1/10	45		60 / 65	PT^1	B^1 - 1^v, 2^{v}5, 5^v	B^1 - 1^v, 2^{v}5, 5^v	9.3	10.6	*0.206*	*0.176* / *0.192*	20^{mm}	100
1895	sur le **Lein**[3].		»	29.60	23.10	1/6.6	50		80		B^1 — 1^v, 2^{v}5, 5^v		12	15	*0.24*	*0.188*		66
$18\frac{95}{96}$	de **Gemmrigheim**[5], sur le Neckar.		Â^4 r^{te}	38	38	1/6.9	80		90		B^1 — 1^v, 2^{v}5, 5^v		15	18	*0.188*	*0.20*		111
$18\frac{97}{98}$	d'**Ehingen**[6], sur le Danube.		»	2 de 21 / 20			70			B^1 - 1^v, 2^{v}5, 5^v	B^1 - 1^v, 2^{v}5, 5^v	B^1 - 1^v, 2, 4^v	15		*0.214*			83
$19\frac{07}{08}$	de la <u>**Vieille-Route,**</u> à <u>**Lichtensteig**</u>[7].	Suisse	Â^1 I^r	18.50	18.50	1/5.3	90		90	MEV^1	MOV^1	MOV^1	15	20	*0.166*	*0.222*		

B. - Voûtes articulées de façon permanente

$18\frac{97}{98}$	de **Miltenberg**[8], sur le Mein	Bavière	A^{6} r^{te}	31m15 32.70 34.20 34.20 32.70 31.20	30m60 30.64	1/8.93 1/6.24	70cm 70 70 70 75 75	90cm 92 93 98 88 80	80cm 80 80 80 85 85	MOV[1] - Grès	MOV[1] - Grès	PT[1] - Grès	13cm 13 13.5 12.5 10.5 9.5	14cm5 14.5 15 14.5 13 11.5	*0.18* *0.18* *0.19* *0.18* *0.14* *0.13*	*0.16* *0.16* *0.19* *0.16* *0.15* *0.13*	20mm	
$19\frac{01}{02}$	sur l'**Oued Dar-el-Oued**[9]	Algérie, Constantine	C^{3} r^{te}	25	21.65	1/3.464	70		110	MAV[1] - Calcaire dur (Chaux 350k)		PT[1]			*0.33*	*0.33*	16	
	sur l'**Oued Amacin**[9]		A^{4} r^{te}	27	27	1/6	85		110	MAV[1] - Calcaire dur (Ciment 450k)		PT[1]			*0.33*	*0.33*	17	
$19\frac{02}{03}$	de **Reichenbach**, sur l'Isar, à Munich (*Arches rive droite*)	Bavière	A^{n} r^{te} (≥ 40m)[4]	28 27 26			70 70 70		80 80 80	PT[1] Muschelkalk	B[1] - 1r, 2r5, 5r	PT[1] - Granit	20	20	*0.285*	*0.25*	5	
$19\frac{05}{06}$	sur l'**Oued Djemaa**[9]	Algérie, Constantine	E^{3} r^{te}	29.43	27	1/6	90		115	MAV[1] - Grès dur (Ciment 450k)		PT[1]			*0.33*	*0.33*	21	
1906	de **Kempten**, sur l'Iller (*Arches latérales*)	Bavière	A^{1} F^{r} (≥ 40m)[1,2,3]	21.60	17.648	1/3.426	70		115.5	B[1] - 1v, 3v, 6v	B[1] - 1v, 3v, 6v	B[1] - 1v, 2v, 2v	35	57	*0.50*	*0.50*	8	48k
$19\frac{07}{08}$	d'**Altwasser**, sur le Danube, à **Neubourg**[10]	Bavière	A^{3} r^{te}	23.72	22	1/8.3 et 1/9.3	52	64	60	PT[1] Muschelkalk	B[1]							
$19\frac{07}{08}$	de **Garching** sur l'Alz — Ligne de Mühldorf à Freilassing	Bavière	E^{n} F^{r} (≥ 40m)[1]	44.35 33.95 33.89	38.55 28.90 28.90	1/5.33 1/5.43 1/5.43	110 90 90		175 145 145	B[1] - 1r, 2r5, 5r	B[1] - 1r, 2r5, 5r	B[1] - 1v, 2v, 2v	38 » »	83 » »	*0.345* » »	*0.474* » »	8 » »	80 » »
	de **Mühlbach**[11] — Ligne de Mühldorf à Freilassing	Bavière		33.42	29.70													
	de **Halden**[12], sur la Lenne, (*Arches latérales*)	Westphalie			18.50	1/10	50		65	B[1] - 1v, 4v, 6v	B[1] - 1v, 4v, 6v	B[1] - 1v, 6v	20	20	*0.40*	*0.307*	20	
$19\frac{07}{08}$	de **Durbuy**[13], sur l'Ourthe	Luxembourg belge	A^{1} r^{te}		33	1/10	100		150	PT[1] « Petit Granit »			30	50	*0.33*	*0.33*		
$19\frac{11}{12}$	entre **Ulm** et **Neu-Ulm**[14], sur le Danube	Wurtemberg	A^{3} r^{te}		28.50 27	1/7.05 1/7.5												

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6. 2. — Karl von Leibbrand. « *Gewölbte Brücken* », Leipzig, 1897, p. 50. 3. — *Loc. cit., renvoi 2*, p. 66.
4. — Zeitschrift für Bauwesen, 1893, p. 439 à 446, Pl. 50. « *Die Betonbrücke über die Donau bei Rechtenstein (Württemberg)* », von Braun, Kgl. Strassen-Bauinspector in Ehingen.
5. — Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen, 10 septembre 1897, p. 439 à 444. « *Betonbrücke über den Neckar zwischen Kirchheim und Gemmrigheim* ». Präsident von Leibbrand.
6. — Zentralblatt der Bauverwaltung, 1901, p. 506 et 521. — Le plomb était posé dans le béton frais.
7. — Dessins d'exécution, gracieusement communiqués par M. Acatos, Ingénieur en chef du Bodensee-Toggenburgbahn.
8. — Zeitschrift für Bauwesen, 1900, p. 207 à 240, Pl. 35. 9. — Renseignements gracieusement donnés par M. Boisnier, Ingénieur en chef à Constantine.
10. — Dessins d'exécution / 11. — Renseignements { qu'ont bien voulu me donner MM. Sager et Wœrner, de Munich.
12. — Deutsche Bauzeitung, 1905 — Mitteilungen über Zement-, Beton-, und Eisenbetonbau, n° 12, p. 45, 46. — Le plomb était posé dans le béton frais. — A l'arche centrale, les articulations sont en béton.
13. — Annales des Travaux publics de Belgique, 1910, p. 799 à 820. 14. — Beton und Eisen, 1912, Heft II, p. 35. « *Neue Strassenbrücke über die Donau zwischen Ulm und Neu-Ulm*, Dr Ing. A. Kleinlogel, Darmstadt.

Art. 2. — Dimensions des bandes de plomb, d'après le tableau précédent.

A. Largeur j *dans le sens du joint.* — Plus sont réduites les largeurs j_0, j_1 (f_1, f_2), mieux est déterminée la courbe de pression, mais plus le plomb travaille.

Largeur des bandes de plomb
f_1 - Clef f_2 — Retombées

Voici comment ont varié $\frac{j_0}{e_0}$, $\frac{j_1}{e_1}$:

	Maximum	Minimum	Moyenne
$\frac{j_0}{e_0}$	0.50	0.13	0.237
$\frac{j_1}{e_1}$	0.50	0.10	0.242

B. Épaisseur. — Presque toujours 20^{mm} ; avec 20^{mm}, on ferme facilement le joint au mortier.

C. Longueur. — 1^m à 1^m50, avec intervalles entre les bandes de 10^{cm} ; aux têtes, de 5^{cm}.

Art. 3. — Plomb employé. — Travail admis. — On a employé, le plus généralement, le plomb mou ordinaire.

Souvent, on a admis une pression moyenne de 60^k sur toute la largeur de la bande, et supposé que la pression maxima ne dépasse pas 120^k, c'est-à-dire que la résultante se tient dans le 1/3 central de la bande.

ARTICULATIONS ROULANTES

§ 1. — *ARTICULATIONS ROULANTES EN ACIER*

Épaisseurs et Matériaux des voûtes. — Dimensions et Travail des Rotules.

A. - Rotules d'acier prises dans des sabots en fonte

(Voûtes articulées de façon permanente)

e_1 e' e_0 a $b_r = 2a\sigma_r$ — f_s Acier Fonte A B c l

Rayons des surfaces de roulement	convexe..... R_1 =	30°
	concave..... R_2 =	300°
Corde de la courbe de roulement..........	c =	12°
Largeur du sabot à la base...............	l =	30°

TABLEAU SYNOPTIQUE

Date	Ponts (Tous sont sous route) *Tous sont en Bavière*	Symbole	Voûte — Portée totale $2a$	Entre rotules — Portée $2a_r$	Entre rotules — Surbaissement σ_r	Épaisseurs, *en 0m01* — à la clef e_0	Épaisseurs — aux joints de rupture e'	Épaisseurs — aux retombées e_1	Matériaux *Les bandeaux sont en PT[1] — Muschelkalk, les sommiers, en PT[1] — Granit, sur eux, une feuille de plomb de 5mm* — Douelle et Queutage	Rotules — A-t-on mis des goujons contre le glissement ?	Efforts[2] en kg par 0m01 d'arête de contact — à la clef N_0	Efforts — aux retombées N_1	Effort MAX. en kg/$\overline{0^m01}^2$ le long de AB (f_s)
1902-03	**Cornélius,** (sur l'Isar, à Munich)	$\mathrm{A}^{n}\,\mathrm{r}^{te}(\geqslant 40^{m})$[3]	44m / 2 de 38m50	41m / 36	1/12 / 1/10	80cm / 70	120cm / 100	90cm / 80	PT[1] - Muschelkalk / B[1]	non	2872k	3105k	120k
1902-03	de **Reichenbach,** (sur l'Isar, à Munich)	$\mathrm{A}^{n}\,\mathrm{r}^{te}(\geqslant 40^{m})$[4]	44	41	1/10	80	120	90	B[1] - 1v, 2v5, 5v	non	2160	2340	96
1903-05	**Maximilien,** (sur l'Isar, à Munich)	$\mathrm{A}^{n}\,\mathrm{r}^{te}(\geqslant 40^{m})$[6]	45.87	44	1/8.979	80	109	117.5	PT[1] - Muschelkalk	oui[3]	2460	3241	»
1904-05	de **Wittelsbach,** (sur l'Isar, à Munich)	$\mathrm{A}^{n}\,\mathrm{r}^{te}(\geqslant 40^{m})$[7]	44	41	1/10	80	120	90	B[1] - 1v, 2v5, 5v	oui	»	2430	»
1906-07	**Elise,** sur le Danube, à Neubourg.	$\mathrm{A}^{1}\,\mathrm{r}^{te}(\geqslant 40^{m})$[4]	47.50	43.50	1/9.88	95	120	115	B[1] - 1v, 2v3, 4v6	oui	2565	2817	125

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p II, n° 6.

2. — Pour la pression maxima sur la bande de contact, les formules de Hertz (Tome IV, p. 11), donnent de 4700k à 5600k par $\overline{0^m01}^2$.

3. — Après la chute des voûtes.

Date	Ponts On a souligné ceux sous rails	Intrados Rang dans les séries ⩾ 40m	Voûte Portée totale $2a$	Entre rotules Portée $2a_r$	Entre rotules Surbaissement σ_r	Epaisseurs en 0m01 à la clef e_0	Epaisseurs en 0m01 aux joints de rupture e'	Epaisseurs en 0m01 aux retombées e_1	Matériaux	Sommiers[5]	Rotules Nature de l'acier Résistance à l'écrasement en kg/0m01²	Rayons en 0m01 des surfaces de roulement convexe R_1	Rayons en 0m01 des surfaces de roulement concave R_2	Corde de la courbe de roulement c	A-t-on mis des goujons contre le glissement?	Largeur de la base l	Effort en kg par 0m01 d'arête, de contact à la clef N_0	Effort en kg par 0m01 d'arête, de contact aux retombées N_1	Effort MAX. en kg/0m01² le long de AB' (f_4, f_5)
	B. — Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle																		
	B₁. — Voûtes semi-articulées																		
$19\frac{10}{12}$	sur la **Cecina**[2] (*Italie*).	A³ Fr	30m	30m	1/8.82	100	»	125	B¹ Ciment ... 350k Sable ..... 0m³5 Gravier ... 0m³8 230k à 28 j			8cm	10cm	5cm5	non	Clef 80r Retbées 100			
	B₂. — Voûtes articulées de façon permanente																		
1902	de **Tarvis**, sur la Schlitza[3] (2 ponts) (*Autriche-Carinthie*).	A¹ rte	30	30.40	1/9.8	70	82	70	B¹ 1v, 2v, 3v	Caissons en tôle d'acier Martin, de 22mm d'épaisseur	Acier Martin moulé (5800k à 5900k)	15	17		non	60			
1903	de **Forst**, sur l'Etsch[4] *Autriche (Tyrol)*.	A¹ rte	30	30.40	1/9.8	70		70	1v, 2v5, 4v										
	C. — Rotules tout entières en acier moulé																		
	(Voûtes articulées de façon permanente)																		
$19\frac{03}{04}$	d'**Illerbeuren**, sur l'Iller (*Bavière*).	A¹ Fr (⩾ 40m)¹	59	57.164	1/5.82	110	163 165	140	1v, 2v5, 5v	B¹ moulé 1v, 1v5, 1v5 et feuille de plomb de 4mm	Acier Siemens-Martin surfaces trempées sur 5mm 7300k	35	200		non	46	2738k	2932k	68k
$19\frac{04}{05}$	de la **Wallstrasse**, à Ulm (*Wurtemberg*)	A¹ rte (⩾ 40m)³	65.45	57	1/9.827	106	160	150	B¹ 1v, 3v, 5v	B¹ damé 1v, 1v, 2v5	Acier Siemens-Martin surfaces trempées sur 4mm	40	55	10	oui	65	4060	4460	
1906	de **Kempten**, sur l'Iller (*Bavière*)	A¹ Fr (⩾ 40m)1,2,3	64.50 63.80	50.60	1/5.50	135	200	185	1v, 2v5, 5v	B¹ moulé 1v, 2v, 2v	Surfaces trempées sur 10mm au moins 5500k	Clef 50 Retbées 60	200		non	Clef 60 Retbées 72	3132	4207	66
$19\frac{05}{08}$	de **Mannheim**, sur le Neckar (*Grand Duché de Bade*)	An rte (⩾ 40m)⁹	59.50	58.50	1/10.60	107	147	112	Bandeaux : PT¹ - Grès Corps : B¹ - 1v, 4v, 3v	PT¹ Granit et feuille de plomb de 4mm	»	30	60		oui				143

1\. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

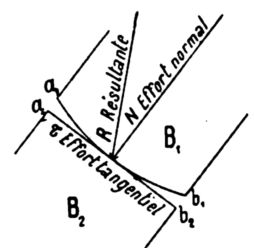
2\. — Pont à 3 voies. — Ligne de Rome à Pise. — 3 arches semi-articulées de 30m en arc, entre 2 inarticulées de 20m en ellipse. — (Rivista tecnica delle ferrovie italiane, mai 1912. « *Nuove fonte per tre binari sul fiume Cecina al km. 282,071 della linea Roma-Pisa* »).

3\. — 2 Ponts pareils sur la Route impériale de Goritz (*Görzer Reichstrasse*), aux km. 2.7385 et 2.943. (Œsterreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst, 30 mai 1903, p. 344 à 350, Pl. 37 à 40. « *Beton Bogenbrücken über die Schlitza bei Tarvis* », Julius Stanek, K. K. Ober-Ingenieur im Ministerium des Innern).

4\. — Pont semblable aux précédents. (Œsterreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst, 2 juillet 1904, p. 476 à 479, Pl. 63, 64. « *Die neue Brücke über die Etsch bei Forst.* » C. Haberkalt).

5\. — Au Pont de Grünwald sur l'Isar, en amont de Munich (1903-1904), — 2 arcs en béton armé ; Portée = 70m ; Montée = 12m80, les rotules en acier moulé, (R_1 = 20c ; R_2 = 25c), pressent, par l'intermédiaire de lames de plomb de 3mm, sur des sommiers en *béton armé*. (Deutsche Bauzeitung, 1904, I, nos 11, 12, 13 : « *Strassenbrücke über die Isar bei Grünwald oberhalb München* », von Direktor Ludwig Zöllner, in München).

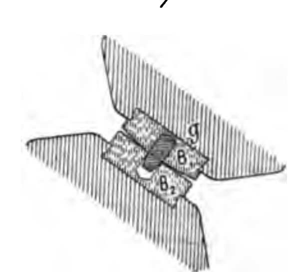
Art. 2. — Précautions contre le glissement. — Si la surface de roulement a_2 b_2 (f_6) est plane, — ou concave avec un très grand rayon, — c'est le frottement seul qui résiste à l'effort tangentiel 𝕿 [6].



f_6
Effort de glissement 𝕿 dans une articulation roulante

Au pont d'Illerbeuren [7], les rotules ont glissé au décintrement, de 10mm et 18mm.

Au pont Maximilien [8], on avait diminué le frottement en lubrifiant les surfaces à la stéarine : les rotules ont glissé, les voûtes sont tombées.



f_7
Goujons g empêchant le glissement d'une articulation roulante

Depuis [9], dans les articulations métalliques, on a en général prévenu le glissement en encastrant dans le bloc convexe B_1, sur l'arête théorique de contact, des goujons d'acier g [10] (f_7).

Art. 3. — Avantages et inconvénients. — Avec l'acier, — le plus dur des matériaux pour rotules, — les rayons des surfaces de roulement sont plus petits, la différence de courbure plus grande, la courbe de pression mieux déterminée. Mais les rotules d'acier craignent la rouille, et on ne peut guère les en défendre [11].

6. — Voir, pour la valeur du frottement, les expériences de M. Föppl, Tome IV, p. 22.

7. — A¹ Fr ($\geqslant$ 40m)¹, 1903-04, Tome IV, p. 159.

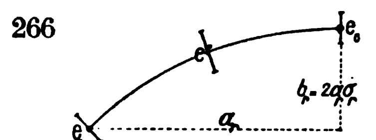
8. — Aⁿ rte ($\geqslant$ 40m)⁶, 1903-05, Tome IV, p. 192.

9. — Voir les Tableaux synoptiques, p. 263 et 264.

On n'a pas mis de goujons aux Ponts de Kempten, A¹ Fr ($\geqslant$ 40m)1, 2, 3 (Tome IV, p. 115), sans doute parce que l'arc articulé est peu surbaissé et que par suite le glissement est moins à craindre.

10. — On les calcule pour résister par cisaillement à l'effort 𝕿.

11. — Au pont d'Illerbeuren [7], on a vu sur le sol des taches de rouille sous les rotules.



Art. 1. — Epaisseurs et Matériaux des Voûtes.

Schéma de l'articulation	Date	Ponts (On a souligné ceux sous rails)	Pays	Intrados — Rang dans les séries $\geqslant 40^m$	Voûte — Portée totale $2a$	Entre rotules — Portée $2a_r$	Entre rotules — Surbaissement σ_r	Épaisseurs, en 0^m01 — à la clef e_0	Épaisseurs — aux joints de rupture e'	Épaisseurs — aux retombées e_1
a) – **En Pierre**					*A. – Voûtes semi-articulées*					
	1880	de **Langenhennersdorf** [2]	Saxe	A^n F^r	13^m	13^m	1/4.33	50^{cm}	»	60^{cm}
					B. – Voûtes articulées					
	1898-1900	de **Chemnitz**	Saxe	E^n F^r ($\geqslant 40^m$)^1	43.10 27.90 (4 v^{tes}) 26.65 (6 v^{tes})			110 70 »	150 103 »	125 80 »
	1899-1900	de **Grasdorf**	Hanovre	A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)^1	40	40.39	1/8.93	85	116	90
f_6	1901-03	de **Hochberg**	Wurtemberg	A^n r^{te} ($\geqslant 40^m$)^2	39.40	40	1/7.407	75	104	75
	1902	de **Dusseldorf** [3]	Prusse rhénane	A^1 r^{te}	30.13	28.02	1/14.6	65	85	70
	1903-04	de **Göhren**	Saxe	A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)^2	60	60.56	1/8.89	110	150	120
	1908-10	de **Kubel** [4], sur la Sitter	Suisse	C^n F^r	25	19.04	1/4.327	100	»	126
	1910-11	de **Nesslau** [5], sur la Thur	Suisse	A^1 F^r	24.82	25.66	1/7.265	110	140	140
f_9	1896	d'**Imnau** [6], sur l'Eyach	Hohenzollern	A^1 r^{te}	»	30	1/10	45	80	50
f_{10}	1903-05	de **Neckargartach**	Wurtemberg	A^n r^{te} ($\geqslant 40^m$)^5	40	40	1/7.55 à 1/9.14	75	100 env.	80
b) – **En Béton**	1894-96	de **Dresde** [7]	Saxe	E^5 F^r	31.35 (5 v^{tes})					
	»	de **Hauconcourt** [8] (sur la Moselle)	Lorraine allemande	A^5 r^{te}	33 (5 v^{tes})	33	1/7.67	65	125	77
	1899-1901	de **Malling** (sur la Moselle)	Lorraine allemande	A^n r^{te} ($\geqslant 40^m$)^1	40	40.50	1/8.56	88	110	100
f_{11}	1904-05	de **Moulins-lez-Metz** (sur la Moselle)	Lorraine allemande	A^n r^{te} ($\geqslant 40^m$)^8	44	44.70	1/7.906	95	119	115
					40 (2 v^{tes})	40.54	1/8.463	90	112	105
	1906-07	de **Sauvage** [9] (sur la Moselle)	Lorraine allemande	A^4 r^{te}	36	36	1/7.04	70	115	80
					34 (2 v^{tes})	34	1/7.53 et 1/8.27	70	100	80
					30	30	1/7.75	70	98	80
	»	de **Halden** [10], sur la Lenne (*arche centrale*)	Westphalie		»	25	1/9.09	50		50
	1904-05	de **Britz** [11], sur le canal de Teltow (au sud de Berlin)	Prusse	A^1 r^{te}	39	36.42	1/7.5	75	112	80
	1909-10	de **Dennhausen** [12], sur la Fulda	Prusse, Hesse	A^3 r^{te}	38 (3 v^{tes})	36	1/8.93 et 1/9.39	70	92	75
c) – **En Béton armé** f_{12}	1907	de **Rothenburg** [13], sur la Neisse	Silésie	A^5 F^r	30 (5 v^{tes})	30.50	1/7.26	55	100	70
f_{13}	1907-10	de **Frédéric-Auguste** [14], à **Dresde**	Saxe	A^9 r^{te}	39.30 (2 v^{tes}) et 4 v^{tes} de 36^m15 à 28^m33	34.10	1/6.9	95		125
	1911-12	de **Gräveneck**	Prusse, Hesse	A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)^1	48	48.425	1/6.248	60	102	75

Dimensions et Travail des Rotules.

TABLEAU SYNOPTIQUE

Matériaux	Rotules — Matériaux *Résistance à l'écrasement en kg/0^m01²*	Rotules — Dispositif entre les surfaces de roulement	Rotules — Rayons, *en 0^m01* des surfaces de roulement — convexe R_1	Rotules — Rayons — concave R_2	Effort en kg par 0^m01 d'arête de contact — à la clef N_0	Effort — aux retombées N_1	Pression maxima en kg/0^m01² sur la bande de contact, indiquée par l'auteur du projet
	Grès – *289^k*		97^c7	110^c5			31^k
	de façon permanente						
B ¹ — 1,^v 4^v, 4^v5	Granit					3510^k	Pr. moyenne 300
B ¹ — 1^v, 5^v, 6^v5						1830	
B ¹ — 1^v, 2^v5, 4^v5	*1099^k*		Clef 185 Ret^bées 200	270			145
B ¹ { 1^v, 2^v5, 5^v 1^v, 2^v, 4^v			500	∞			346
B ¹ — 1^v, 4^v, 4^v *278^k à 6 mois*			209	275			
MOV ¹ – Granulite			Clef 985 Ret^bées 1086	2000	3850^k	3960	150
MEV ¹			Clef 100 Ret^bées 240	120 300			
MEV ¹			Clef 325 Ret^bées 400	385 475	1540	2177	70.5 75.5
B ¹ — 1^v, 2^v5, 5^v	*1006^k*	Bandes de plomb de 5^mm et 2 feuilles de cuivre	10	10.4	1414	1061	150
B ¹ { 1^v, 2^v5, 4^v5 1^v, 2^v5, 1^v5			500	∞		3200	538
Béton { 1^v, 5^v, 6^v75 1^v, 5^v, 5^v	Béton — 1^v, 2^v5, 2^v5		250	320	2310		Pr. moyenne 143 à 204
1^v, 3^v, 4^v5	1^v, 2^v5, 2^v5		235	300	1590	1920	120 (Barkhausen)
{ 1^v, 3^v, 6^v 1^v, 3^v, 4^v5	1^v, 2^v, 2^v	Sur 3^cm à 4^cm, mortier (c^t 1^v; sable fin 2^v)	280	325	2280		
{ 1^v, 2^v5, 5^v 1^v, 2^v, 4^v Bandeaux en PT ¹	1^v, 2^v, 2^v	*Fond des moules en fonte*	280	325	2330	2710	
1^v, 2^v5, 5^v	1^v, 2^v, 2^v	*Fond des moules en plâtre*	250	327		1500	104 (Barkhausen)
1^v, 4^v, 6^v	1^v, 2^v, 2^v *300^k*	Bandes de plomb de 2^mm	200	313			60
{ 1^v, 5^v, 6^v5 1^v, 4^v, 4^v Bandeaux en grès	1^v, 2^v5, 2^v5 *172^k à 28 j.*	Sur 10^cm mortier (1^v, 2^v)	280	325			
1^v, 3^v5, 3^v5	1^v, 1^v, 2^v5						
Béton — 1^v, 5^v	Béton armé — 1^v, 3^v	Sur 10^cm mortier (1^v, 2^v5)	290	350			
Bandeaux en grès	1^v, 2^v5, 2^v5						90
1^v, 2^v, 5^v	1^v, 1^v5, 2^v5	Mortier (1^v, 1^v)	Clef 350 Ret^bées 340	450 425	1394	1683	177

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

2. — Zeitschrift der Architekten-und Ingenieur Vereins zu Hannover, 1888, p. 378 à 380. « *Uber die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben* », von Geh. Finanzrath C. Köpcke, zu Dresden.

3. — Pont construit pour l'Exposition de Dusseldorf, démoli en 1908. (F. von Emperger — Handbuch für Eisenbetonbau, 2e édition ; vol. I, p. 214 à 230).

4. — Viaduc de la ligne Romanshorn-St-Gall-Wattwil, près de St-Gall. Travée centrale de 120^m, avec, de chaque côté, un viaduc d'accès en plein cintre de 25^m. Piles-culées de 85^m et 59^m de haut entre la travée et les arches adjacentes, lesquelles sont articulées. (Schweizerische Bauzeitung, 10 sept. et 29 oct. 1910, « *Der Sitterviadukt der Bodensee-Toggenburgbahn* ». MM. A. Acatos, L. Lüchinger, A. Ackermann).

5. — Ligne d'Ebnat à Nesslau. — Dessins d'exécution, gracieusement remis par M. Acatos, Ingénieur en chef du Bodensee-Toggenburgbahn.

6. — Zeitschrift für Bauwesen, 1898, p. 187 à 206, Pl. 26.

7. — 4 voies. — 5 voûtes de décharge en anse de panier de 15^m à 31^m, articulées à la clef et à 60°. — Aux plus grandes voûtes, les rotules sont en béton, aux autres, en grès. — (*Gewölbte Brücken*, Karl von Leibbrand, Leipzig 1897, p. 73 et 74).

8. — Centralblatt der Bauverwaltung, 22 juillet 1908, p. 395, 396. — Dessins d'exécution gracieusement remis par M. Blumhardt, Ingénieur en chef à Strasbourg.

9. — Deutsche Bauzeitung, 1907. — Mitteilungen über Zement-, Beton-, und Eisenbetonbau, n°s 18 et 19.

10. — Id.. 1905, p. 45, 46. — Arches latérales articulées sur plomb.

11. — Deutsche Bauzeitung, 9 septembre 1905, p. 433 à 436.

12. — F. von Emperger. — Handbuch für Eisenbetonbau, 2e édition. Vol. VI. Brückenbau, p. 511 et 664.

13. — Deutsche Bauzeitung, 1908. — Mitteilungen über Zement-, Beton-, und Eisenbetonbau, n° 20, p. 101, 102, n° 21, p. 106, 107.

14. — A 3 arches de 17^m60, 22^m, 24^m05, les articulations sont des bandes de plomb occupant le 1/4 central du joint. (Deutsche Bauzeitung, 1910 ; 8 juin, p. 354, 355 ; 11 juin, p. 363, 367 ; 22 juin, p. 383 et 384).

Art. 2. — Avantages et inconvénients des articulations roulantes en pierre, en béton. — En pierre ou en béton, les articulations ne craignent pas l'humidité ; elles n'exigent pas d'entretien ; mais elles sont lourdes et il est malaisé de les mettre en place [15].

Il est très difficile de bien dresser les surfaces de roulement.

15. — Pont de Grasdorf A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)^1, Tome IV, p. 129.

ARTICULATIONS TOURNANTES *(Balanciers tournant autour d'un tourillon)*

Art. 1. — Epaisseurs et Matériaux des voûtes. — Dimensions et Travail des rotules — TABLEAU SYNOPTIQUE

Schéma de l'articulation	Date	Ponts — Tous sous route	Intrados — Rang dans les séries ⩾ 40m	Voûte — Portée totale $2a$	Voûte — Entrerotules — Portée $2a_r$	Voûte — Entrerotules — Surbaissement σ_r	Voûte — Épaisseurs en 0m01 — à la clef e_0	Voûte — Épaisseurs — aux joints de rupture e'	Voûte — Épaisseurs — aux retombées e_1	Voûte — Matériaux — Voûte (Vte) Sommiers (Somm.)	Rotules — Tourillon — Matière	Rotules — Tourillon — Diamètre d	Rotules — Balanciers — Matière	Rotules — Balanciers — Largeur l	Efforts en kg par 0m01 de génératrice de contact — à la clef N_0	Efforts — aux retombées N_1	Efforts maxima en kg 0m01² — Tourillon	Efforts maxima — Balanciers	Efforts maxima — Sommiers	Les rotules sont-elles apparentes ?
	1895	d'**Inzigkofen** *(Hohenzollern)*	A¹ rte (⩾ 40m)[1]	47m90	43m	1/9.81	70c	110c	78c	B¹ Vte: 1v,2v5,4v5 / 1v, 2v, 3v; *Somm. (1v, 1v5, 1v5)*	Fonte[2]			Clef 60c Retomb. 68c	2125k	2358k	Clef 232k, Retombées 292	Flexion 128k, 131	44k, 43[3]	oui
f_{11} (Acier; Fonte ou Acier)	1899/1900	de **Neckarhausen** *(Hohenzollern)*	A¹ rte (⩾ 40m)[2]	59.40	50	1/11	85	120	90	B¹ - 1v, 2v5, 5v	Acier	10c		75	3820	3648	Clef 382, Retombées 365	Tension 221, Compr. 346	Clef 64, Retombées 58[4]	oui
	1900/01	du **Prince-Régent** à Munich.	A¹ rte (⩾ 40m)[3]	62.40	63	1/9.692	100	148	120	Vte - PT¹ Muschelkalk; *Somm. (PT¹ - Granit)* *feuille de plomb de 5mm*	Acier[5]	10c	Fonte		4170	4300	600		100	non
	1901/02	**Max-Joseph** à Munich.	A¹ rte (⩾ 40m)[4]	64	60	1/10	105	140	120	PT¹; Vte Muschelkalk; *Somm. (Granit)*	Acier[6]	10c	Fonte				600		100	non
f_{15} (Fonte; Acier)	1897	de **Burzweiler**[7] sur la Doller *(Alsace)*	A¹ rte	34.20	34	1/8.39	75	105	75	B¹ - 1v, 3v, 4v5	Acier	8								oui
f_{16} (Fonte; Acier)	1906	de **Brookside Park**[8] sur le Big Creek, à Cleveland *(États-Unis, Ohio)*	A¹ rte	28.04	26.33	1/16.5	61		91	B¹ - 1v, 2v5, 5v	Acier	3.8		15.2						non
f_{17} (Acier)	1906	par-dessus la gare d'eau **Branla**[9] sur la Saône, près de Lyon	A¹ A¹ rte	25 (2 voûtes jumelles)	25	1/10	30		30	PT¹ Joints en zinc coulé		7	Acier	30			260			oui

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.
2. — 8 rotules à la clef, 9 aux retombées. — L'ensemble pèse 15t et coûte 3700f.
3. — en tenant compte du vent ; sans vent, 32k1.
4. — en tenant compte du frottement des tourillons.
5. — 30 rotules par articulation.
6. — Les rotules pèsent ensemble 60t.
7. — Dr Ing. F. von Emperger. — Handbuch für Eisenbetonbau. - Dritter Band —Berlin, Wilhelm Ernst et fils, p. 22 à 24.
8. — Engineering News, 10 mai 1906, p. 507 et 508. « *Three hinged concrete arch bridge, Brookside Park, Cleveland, O* ». H. F. Hackedorn.
9. — Annales des Ponts et Chaussées, 1907, V, p. 6 à 59. « *Pont à arcs de pierre de taille articulés à la clef et aux naissances, avec joints coulés en zinc.* » M. Henri Tavernier, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Art. 2. — Avantages et inconvénients des articulations tournantes. — D'après M. Max Leibbrand [10], auteur des ponts d'Inzigkofen [11], de Neckarhausen [12], de Sigmaringen [13], l'articulation tournante serait moins chère, plus sûre, plus facile à poser, que l'articulation roulante.

L'expérience ne paraît pas avoir décidé.

10. — Zeitschrift für Bauwesen, 1903, - p. 455 à 476, Pl. 54 et 55 : « *Die Neckarbrücke bei Neckarhausen (Hohenzollern)* », Max Leibbrand, Landes-Baurat, 20 août 1902.

11. — A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)^1, Tome IV, p. 225.

12. — A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)^2, Tome IV, p. 232.

13. — Tome IV, p. 253.

ARTICULATIONS A GENOU

EMPLOYÉES SEULEMENT COMME ARTICULATIONS PROVISOIRES, PUIS CONDAMNÉES

Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle.

Epaisseurs et Matériaux des Voûtes. — Dimensions et Travail des rotules.

TABLEAU SYNOPTIQUE

Date	Ponts On a souligné ceux sous rails	Pays	Intrados Rang dans les séries $\geqslant 40^m$	Voûte Portée totale $2a$	Entre rotules Portée $2a_r$	Entre rotules Surbaissement σ_r	Épaisseurs, *en 0m01* à la clef e_0	Épaisseurs aux joints de rupture e'	Épaisseurs aux retombées e_1	Matériaux	Rotules d'acier Surfaces de roulement Rayon R	Rotules Corde c	Caissons en tôle Hauteur h	Caissons Largeur l	Effort en Kg par 0m01 de génératrice de contact à la clef N_0	Effort aux retombées N_1	Efforts maxima en Kg/$\overline{0^m01}^2$
1893	de **Munderkingen.**	Wurtemberg	$\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)[1]	59m	50m	1/10	100c	140c	110c	B¹ - 1v, 2v5, 5v	15c	7c	80c	23c	3413k	3846k	au contact 681k dans les caissons (flexion) 870 sur AB de f_1, 59
1895-96	de la **Coulouvrenière,** à Genève.	Suisse	$\hat{A}^n$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)[1]	40	40	1/7.407	100	140	120	B¹ - 425k, 0mc5, 0mc8	10	5,5	100	28	2014	2357	
1901	de **Sinigaglia**[2], sur le Rosso.	Italie	$\hat{A}^3$ Fr	»	22	1/10	80		100								
1902 03	de **Morbegno.**	Italie	$\hat{A}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)[1]	70	66 environ	1/7	150		220	PT¹ - Granit	25	15	Clef 80 Retombées 110	27.2	5980	5567	au contact 500 dans les caissons Clef 750[3] Retombées 850

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, p. II, n° 6.

2. — Ligne de Bologne à Foggia (Genio Civile, septembre 1902).

3. — en tenant compte du mortier de ciment entre les caissons d'une même pile, et en lui attribuant un coefficient d'élasticité $= \frac{1}{10}$ de celui de la tôle.
sans en tenir compte, la tôle des caissons travaille à 1150k à la clef, et 1300k aux retombées (S"1, Tome IV, p. 75).

CHAPITRE V

DISPOSITIONS DES ARTICULATIONS DANS LES PONTS BIAIS

Aux ponts de Munderkingen[1] biais à 75°, et Elise[2] biais à 81°20, les articulations sont en échelons perpendiculaires à l'axe longitudinal.

Au pont de Sigmaringen[3], biais à 75°57', on a disposé les rotules parallèlement à l'axe transversal du pont, en prévenant le glissement latéral.

Dans les ponts larges très biais, il vaudrait mieux construire la voûte par anneaux indépendants.

1. — $\mathbf{A}^1$ r^{te} $(\geqslant 40^m)^1$ — Tome IV, p. 45.
2. — $\mathbf{A}^1$ r^{te} $(\geqslant 40^m)^4$ — Tome IV, p. 151.
3. — Tome IV, p. 253.

TITRE II

QUELQUES DIMENSIONS ET DISPOSITIONS
SPÉCIALES AUX VOÛTES ARTICULÉES

§ 1. — *RENFLEMENT AUX « JOINTS DE RUPTURE »*

Pour ne pas avoir de tension entre les articulations de clef et des reins, on a souvent renflé la voûte en fuseau, forme désagréable, surtout quand l'arc n'est pas très surbaissé.

Si les tympans sont pleins, on peut le dissimuler; non, s'ils sont évidés.

§ 2. — *ÉPAISSEURS*

Art. 1. — Les voûtes articulées sont moins épaisses que les inarticulées. — Dans les voûtes à 3 articulations, on est sûr des efforts : comme ils sont, du moins près des articulations, concentrés vers les milieux, les matériaux sont mieux utilisés.

Pour ces deux motifs, les épaisseurs y peuvent être moindres que dans les voûtes inarticulées.

De combien ?

Art. 2. — Formules empiriques provisoires. — Il n'existe pas encore assez de voûtes articulées pour établir des formules empiriques d'épaisseurs auxquelles on se puisse fier.

Voici les timides indications permises.

Entre leurs rotules, les ponts articulés sont toujours en arc, assez ou très surbaissé; pour ces arcs, inarticulés, voici les formules empiriques établies : [1]

$$e_0 \begin{pmatrix}\text{épaisseur}\\ \text{à la}\\ \text{clef}\end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix}\text{coefficient}\\ \text{numérique}\end{pmatrix} \left[1 + \sqrt{2a \text{ (portée)}}\right] \times \frac{4}{3} \left[1 - \sigma \text{ (surbaissement)} + \sigma^2\right]$$

$$e_1 \begin{pmatrix}\text{épaisseur}\\ \text{aux reins}\end{pmatrix} = \lambda\, e_0 = e_0 \times (1 + 12\,\sigma^2)$$

Entendons ici par $2a$ la portée, et par σ le surbaissement, entre articulations et non plus entre naissances.

Soit $e' \begin{pmatrix}\text{épaisseur au « joint de rupture »}\\ \text{c'est-à-dire au joint le plus renflé}\\ \text{entre les articulations de clef et des reins}\end{pmatrix} = \lambda'\, e_0$

Au tableau suivant, on donne α, λ, λ', pour 74 voûtes semi-articulées ou articulées.

D'après lui, il semble qu'on puisse provisoirement conserver pour l'épaisseur à la clef des voûtes articulées les formules des voûtes inarticulées, en abaissant le coefficient numérique α, — par exemple pour un pont-route de 0,15 à 0,09 [2].

1. — Tome III, Livre II, Titre I, Chapitre III.

2. — α est réduit à 0,095 pour les voûtes inarticulées en arc très surbaissé de 40m et plus, de Ziegenhals, Michelau, Schwusen, Kupferhammer (Tome III, p. 208, 209, 213, 214); il descendrait même à 0,075 au pont de Huzenbach (Tome III, p. 206).

e_0 Épaisseur à la clef
e' — aux « joints de rupture »
e_1 — aux retombées

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES

Rapports : $\alpha_r = \dfrac{e_0}{\left(1+\sqrt{2a_r}\right)\frac{4}{3}\left(1-\sigma_r+\sigma_r^2\right)}$

Pont de [3]	Portée totale $2a$	Portée entre rotules $2a_r$	Matériaux[4] du corps de la voûte	α_r	λ	λ'
I. — VOÛTES SEMI-ARTICULÉES						
A. — PONTS-ROUTE						
Articulations sur plomb						
Höfen	41m	28m		*0.132*	1.5	
Wildbad	22.60	15.60	PT	*0.090*	1.6	
Neuneck	23	17		*0.068*	2	
Marbach	43.50	32	MEV	*0.148*	1.25	
Baiersbronn sur la Murg	40	33	PT	*0.074*	1.33	
Baiersbronn sur la Forbach	32	25		*0.084*	1.33	
Ehingen Passage supérieur	23	18		*0.078*	2.22	
Rechtenstein	23	23	B	*0.093*	1.38	
Mühlheim	29.20	22		*0.066*	1.33	
sur le Lein	29.60	23.10		*0.077*	1.60	
Gemmrigheim	38	38		*0.094*	1.12	
			MAX.	*0.148*	2.22	
			min.	*0.068*	1.12	
moyenne			....	*0.091*	1.51	
			sans compter Höfen et Marbach	*0.080*	»	
Articulations à genou						
Munderkingen	59	50	B	*0.101*	1.1	1.4
Coulouvrenière	40	40		*0.115*	1.2	1.4
B. — PONTS SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE						
Articulations sur plomb						
sur la Vieille-Route, à Lichtensteig	18.50	18.50	MOV	*0.151*	1	»
Articulations roulantes						
en pierre						
Langenhennersdorf	13	13	»	*0.098*	1.20	
en acier						
sur la Cecina	30	30	B	*0.128*	1.25	
Articulations à genou						
Sinigaglia	»	22	»	*0.115*	1.25	
Morbegno	70	66 env.	PT	*0.137*	1.47	

Pont de [3]	Portée totale $2a$	Portée entre rotules $2a_r$	Matériaux[4] du corps de la voûte	α_r	λ	λ'
II. — VOÛTES ARTICULÉES DE FAÇON PERMANENTE						
A. — PONTS-ROUTE						
Articulations sur plomb						
Miltenberg	31m15	30m60	MOV	*0.091*	1.14	1.40
	31.20	30.64		*0.100*	1.13	1.17
Oued Dar-el-Oued	25	21.65	MAV	*0.117*	1.57	»
Oued Amacin	27	27		*0.119*	1.29	»
Reichenbach (Voûtes R D)	28-27-26		B		1.14	»
Oued Djemaa	29.43	27	MAV	*0.126*	1.28	»
Altwasser	23.72	22	B	*0.080*	1.15	1.24
Halden (Arches latérales)		18.50		*0.078*	1.30	»
Durbuy		33	PT	*0.124*		1.50
			MAX.	*0.126*	1.57	
			min.	*0.078*	1.13	
			moy.	*0.104*	1.25	
Articulations roulantes						
en pierre						
Grasdorf	40	40.39		*0.095*	1.05	1.36
Hochberg	39.40	40	B	*0.090*	1	1.38
Dusseldorf	30.13	28.02		*0.083*	1.09	1.31
Göhren	60	60.56	MOV	*0.104*	1.09	1.36
Imnau		30	B	*0.058*	1.11	1.78
Neckargartach	40	40		*0.086*	1.06	1.33
en béton						
Hauconcourt	33	33		*0.082*	1.18	1.92
Malling	40	40.50		*0.100*	1.13	1.25
Moulins-lez-Metz	44	44.70		*0.105*	1.21	1.25
	40	40.54		*0.102*	1.16	1.24
Sauvage	36	36		*0.085*		1.64
	34	34	B	*0.087* / *0.086*	1.14	1.43
	30	30		*0.091*		1.40
Halden (Arche centrale)		25		*0.070*	1	1.31
Britz	39	36.42		*0.089*	1.06	1.49
Dennhausen	38	36		*0.083*	1.07	1.31

3. — Pour ces ponts, voir les Tableaux synoptiques, p. 260, 261, 263, 264, 266, 269, 271.
4. — Pour le sens des abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

$\lambda = \frac{e_1}{e_0}$ $\lambda' = \frac{e'}{e_0}$

TABLEAU SYNOPTIQUE

II. — VOÛTES ARTICULÉES
DE FAÇON PERMANENTE *(Suite)*

A. — *PONTS-ROUTE (Suite)*

Pont de [3]	Portée totale $2a$	Portée entre rotules $2a_r$	Matériaux[4] du corps de la voûte	α_r	λ	λ'
Articulations roulantes *(Suite)*						
en béton armé						
Frédéric-Auguste, à Dresde	39m30	34m10	B	*0.120*	1.31	
Gräveneck	48	48.425	B	*0.065*	1.25	
en acier						
Cornélius	44	41	PT	*0.088*	1.12	1.50
	38.50	36	B	*0.082*	1.14	1.43
Reichenbach	44	41	B	*0.090*	1.12	1.50
Maximilien	45.87	44	PT	*0.087*	1.46	1.36
Wittelsbach	44	41	B	*0.090*	1.12	1.50
Élise	47.50	43.50	B	*0.103*	1.21	1.26
Tarvis	30	30.40	B	*0.090*	1.	1.17
Forst	30	30.40	B	*0.090*	1.	»
Wallstrasse	65.45	57	B	*0.103*	1.41	1.51
Mannheim	59.50	58.50	B	*0.102*	1.04	1.37
Pour toutes les articulations roulantes			MAX.	*0.120*	1.46	1.92
			min.	*0.058*	1.	1.17
			moy.	*0.0895*	1.14	1.41
Articulations tournantes						
Inzigkofen	47.90	43	B	*0.078*	1.11	1.57
Neckarhausen	59.40	50	B	*0.086*	1.05	1.41
Prince-Régent	62.40	63	PT	*0.092*	1.2	1.48
Max-Joseph	64	60	PT	*0.099*	1.14	1.33
Burzweiler	34.20	34	B	*0.092*	1.	1.40
Brookside Park	28.04	26.33	B	*0.079*	1.49	»
Branla	25	25	PT	*0.041*	1.	»
			MAX.	*0.099*	1.49	1.57
			min.	*0.041*	1.	1.33
			moy.	*0.081*	1.14	1.44
Pour toutes les voûtes articulées, sous route			MAX.	*0.148*	2.22	1.92
			min.	*0.041*	1.	1.12
			moy.	*0.091*	1.16	1.41

B. — *PONTS SOUS CHEMIN DE FER*
A VOIE NORMALE

Pont de [3]	Portée totale $2a$	Portée entre rotules $2a_r$	Matériaux[4] du corps de la voûte	α_r	λ	λ'
Articulations sur plomb						
Kempten (Arches latérales)	21m60	17m648	B	*0.127*	1.65	
Garching	44.35	38.55	B	*0.135*	1.59	
	33.95 / 33.89	28.90	B	*0.124*	1.61	
Articulations roulantes						
en pierre						
Chemnitz	43.10		B		1.14	1.36
Kubel	25	19.04	MEV	*0.169*	1.26	
Nesslau	24.82	25.66	MEV	*0.154*	1.27	1.27
en béton armé						
Rothenburg	30	30.50	B	*0.072*	1.27	1.81
en acier						
Illerbeuren	59	57.164	B	*0.112*	1.27	
Kempten (Grandes arches)	64.50 / 63.80	50.60	B	*0.148*	1.37	1.48

§ 3. — *JOINTS DE DILATATION*

Au-dessus des voûtes inarticulées, on n'a que très exceptionnellement prévu des joints de dilatation.

Dans les voûtes articulées, les mouvements dûs aux variations de température sont plus grands : les joints de dilatation y sont nécessaires au-dessus des articulations.

Ces joints verticaux qui coupent les tympans sont d'aspect assez fâcheux[5]. On les dissimule, si on le peut.

TITRE III

QUELQUES ÉLÉMENTS DE COMPARAISON
ENTRE LES VOÛTES INARTICULÉES ET ARTICULÉES

§ 1. — *PRIX DE REVIENT*

Les voûtes articulées coûtent-elles moins que les inarticulées ?

Sans doute, elles sont plus minces. Mais les articulations sont chères, difficiles à placer.

Il n'est guère possible de comparer utilement les unes aux autres : les projets, les matériaux, les conditions locales, les prix des carrières, des ouvriers, les fondations, diffèrent trop.

Si on compare quelques voûtes qui semblent à peu près comparables[6], on n'a

5. — Voir dans les monographies (Tome IV), les photographies des ponts de : Garching, p. 95, 97; Kempten, p. 119; Elise, p. 151; Illerbeuren, p. 159; Hochberg, p. 178; Mannheim, p. 207, 208.

6.

Pont de :	Symbole	Matériaux	$2a$	σ	Prix du m. q. en plan	Prix du m. c. du solide circonscrit
VOÛTES ARTICULÉES						
Neckargartach	$\bar{A}^{n}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{5}$	B	5 v^{tes} de 40^{m}	1/7,75 à 1/9,14	170'1	15'6
Wallstrasse	$\bar{A}^{1}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{3}$	B	$65^{m}45$	1/5,48	216,4	19,0
Neckarhausen	$\bar{A}^{1}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{2}$	B	$59^{m}40$	1/11	284,4	37,2
Moulins-l.-Metz	$\bar{A}^{n}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{8}$	Bandeaux en PT Corps en B	44^{m} et 2 v^{tes} de 40^{m}	1/7,72 et 1/8,37	227,1	24,2
Maximilien	$\bar{A}^{n}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{6}$	PT	2 v^{tes} de $45^{m}87$	1/8,98	431,5	39,0
Illerbeuren	$\bar{A}^{1}$ F^{r} $(\geqslant 40^{m})^{1}$	B	59^{m}	1/5,82	274,9	21,7
			Moyennes............		267'4	26'1
VOÛTES INARTICULÉES						
Schweich	$\bar{A}^{n}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{7}$	B	3 v^{tes} de 46^{m}	1/7,45	135'2	13'0
Guggersbach	$\widehat{A}^{1}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{11}$	B	$50^{m}20$	1/6,11	156,6	15,6
Claix	$\widehat{A}^{1}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{5}$	PT, MEV, MOV	52^{m}	1/6,46	251,6	26,6
Boucicaut	$\bar{A}^{n}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{2}$	PT, MAV	5 v^{tes} de 40^{m}	1/8	259,7	21,3
Orléans	$\bar{A}^{n}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{4}$	PT, MAV	7 v^{tes} de $43^{m}85$	1/7,56	482,2	39,2
Gour-Noir	$\widehat{A}^{1}$ F^{r} $(\geqslant 40^{m})^{6}$	PT, MEV	62^{m}	1/3,73	383,2	22,3
			Moyennes............		278'1	23'0

pas l'impression qu'il y ait économie à articuler.

§ 2. — *MOUVEMENTS DE LA CLEF AU DÉCINTREMENT, AUX CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE*

Dans les voûtes inarticulées, les sections d'appui et de clef restent dans le même plan : elles contrarient les mouvements de la clef.

Dans les voûtes articulées, elles se meuvent librement.

Ces mouvements y devraient être plus grands.

En comparant ce qu'indiquent nos tableaux synoptiques, on ne le constate guère.

Nombre de voûtes inarticulées, très bien faites, en excellents matériaux (par exemple, celles de Valence), ont tassé tout autant qu'un pont articulé d'intrados comparable.

C'est que les tassements dépendent d'une foule de causes qui masquent l'effet de l'articulation : forme de la voûte, — portée totale et entre rotules, — type de rotules, — matériaux (pierre, mortier), — soins dans l'exécution, — mode d'exécution (rouleaux, tranches), temps sur cintre, — époque du décintrement, — écart de température entre le clavage et le décintrement, — sécheresse ou humidité du cintre, de la voûte, — résistance des appuis, etc....

TITRE IV

QUELLES VOÛTES FAUT-IL ARTICULER ?

§ 1. — *LES VOÛTES ARTICULÉES, PLUS SOUPLES, SE PRÊTENT A DES MOUVEMENTS QUI TROUBLENT LES AUTRES. ELLES PEUVENT ÊTRE ACCEPTÉES SUR DES SOLS OU CONTRE DES APPUIS QUI CÈDENT.*

Dans les voûtes à 3 articulations, la courbe de pression est toujours fixée en trois points.

Elles supportent, sans fissures :

pendant la construction, les mouvements du cintre : tassement sous la charge, gonflement des bois par l'humidité, leur contraction par la sécheresse ;

puis, le tassement au décintrement ;

puis, l'ouvrage achevé, les mouvements au passage des surcharges ; — les montées et descentes dûes aux élévations ou abaissements de température (mouvements qui n'augmentent pas leur travail) ; — le gonflement des voussoirs à l'imbibition, — leur contraction à la dessication ; — un mouvement des appuis

(culées ou piles) dû à un tassement du sol[7, 8, 9] ; — le recul d'une culée trop faible, la courbure élastique d'une culée trop haute[10].

§ 2. — *DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE DES VOÛTES ARTICULÉES*

Art. 1. — Pays où l'on n'a articulé que très exceptionnellement les voûtes. — Je connais seulement :

en France[11], les deux anneaux de 25^m du pont Branla[12], les 10 voûtes de 25 à 29^{m}43 des Ponts algériens de l'Oued Dar-el-Oued[13], de l'Oued Amacin[14], et de l'Oued Djemaa[15] ;

en Autriche, les voûtes de 30^m des deux ponts de Tarvis[16] et du pont de Forst[17] ;

aux Etats-Unis, la voûte de 28^{m}04 du pont de Brookside Park, à Cleveland[18].

On a articulé :

en Italie : au poids mort seulement, la voûte de 70^m du pont de Morbegno[19], les deux voûtes de 22^m du pont de Sinigaglia[20] ;

en Suisse : au poids mort seulement, les deux voûtes de 40^m du pont de la Coulouvrenière[21] à Genève ; la voûte de 18^{m}50 du pont sur la Vieille-Route à Lichtensteig[22] ; — et aussi sous les surcharges : les 2 voûtes en plein cintre de 25^m du viaduc sur la Sitter[23], encadrant la travée métallique du milieu ; la voûte en arc de 24^{m}82 du pont de Nesslau[24].

Art. 2. — Allemagne. — C'est en Allemagne qu'on a commencé à articuler les ponts et qu'on en articule le plus.

7. — A un arc de 13^m, surbaissé à 1/7,86, à articulations roulantes en béton, la culée rive gauche avait, à la suite d'une inondation, tassé au point que le contact de clef ne se faisait plus qu'à l'arête supérieure.

On consolida la culée en mouvement ; on remit la voûte sur cintre ; on remplaça les blocs de clef qu'on fit se toucher plus bas qu'au milieu.

Deux ans après, on n'avait pas constaté de nouveau mouvement.

Deutsche Bauzeitung, 1908, 23 mai, p. 283 à 288 ; — 3 juin, p. 303 à 307 : « *Die Anwendung von Gelenken bei Brückenbauten* ». Communication faite au XIe Congrès du « Deutschen Beton Vereins » tenu à Berlin en 1908, par M. l'Ing. dipl. A. Köhler, Directeur technique de la maison Windschild et Langelott, de Cossebaude près Dresde.

8. — Au pont de la Schwimmschule, à Steyr (arc en béton armé de 42^m à 1/16, à 3 articulations) la culée tassa beaucoup au décintrement. — La voûte ne souffrit pas.

Kersten. *Brücken in Eisenbeton.* — II « *Bogenbrücken* », p. 143.

9. — MM. Dyckerhoff et Widmann ont construit, en 1902, pour l'Exposition de Dusseldorf, un pont en béton à 3 articulations roulantes en granit (Tableau synoptique, p. 266).

Bien que le sol de fondation fût peu résistant, le pont se comporta très bien pendant 6 ans.

Avant de le démolir, en octobre 1908, on l'essaya à outrance, en chargeant une 1/2 voûte.

Des fissures se produisirent sous les efforts de :

196^k à la compression dans la 1/2 voûte chargée ; 30^k à la tension, dans la 1/2 voûte non chargée.

Les articulations de clef seules s'exfolièrent.

On dut faire sauter le pont.

Dr Ing. F. von Emperger. — Handbuch für Eisenbetonbau, 2e édition, vol. I, p. 214 à 230.

10. — Voir Tome III, Livre II, Titre III, chap. IV, § III, art. 4.

11. — M. Mesnager a articulé, en réduisant la section en 3 points, les voûtes en béton armé : 1° - du Canal Saint-Martin à Paris (Annales des Ponts et Chaussées, 1910, vol. IV, p. 176) ; 2° - d'Amélie-les-Bains (arche de 44^m à 1/6,66) (Génie Civil, 27 août 1910).

12 à 24. — Voir, pour ces ponts, les Tableaux synoptiques, Tome IV, pages 261, 264, 266, 269, 271.

Voici, par État, le nombre des voûtes allemandes $\geqslant 40^m$, articulées ou non :

Voûtes $\geqslant 40^m$:		articulées				inarticulées			
		Pont de (On a souligné les ponts sous rails)	Matériaux	Nombre d'ouvrages	Nombre de voûtes $\geqslant 40^m$	Pont de (On a souligné les ponts sous rails)	Matériaux	Nombre d'ouvrages	Nombre de voûtes $\geqslant 40^m$
Allemagne du Nord et de l'Est	Prusse rhénane					Mehring [25] Schweich Trittenheim Longuich	B	4	13
	Hesse	Gräveneck	B	1	1				
	Hanovre	Grasdorf	B	1	1				
	Saxe [26]	Göhren [27] Chemnitz	MOV B	2	2	Kleinwolmsdorf sur la Chemnitz [27] Plauen [27]	MEV MOV	3	3
	Silésie					Wengern [27] Ziegenhals Michelau Neuhammer Schwusen Kupferhammer Krappitz Gross-Kunzendorf	MOV	8	8
			Totaux	4	4		*Totaux*	15	24
Allemagne du Sud	Lorraine	Malling Moulins-lez-Metz	B Bandx MEV Corps : B	2	6				
	Grand Duché de Bade	Mannheim	Bandx : PT Corps : B	1	2	Weisenbach Gutach Schwändeholzdobel Langenbrand	B PT	4	4
	Wurtemberg	Höfen Marbach Baiersbronn Munderkingen Wallstrasse Hochberg Neckargartach	PT Bandx PT Corps MEV PT B	7	12	Teinach [28] Huzenbach	PT	2	2
	Hohenzollern	Inzigkofen Neckarhausen	B	2	2				
	Bavière	Pts de Munich [29] : Prince-Régent, Max-Joseph, Maximilien, Cornélius, Reichenbach, Wittelsbach Elise [29] Garching Kempten Illerbeuren	PT Bandeaux PT, Corps B B	12	13				
			Totaux	24	35		*Totaux*	6	6

25. — Projet et Entreprise : MM. Liebold et Cie, d'Holzminden (Brunswick).

26. — C'est en Saxe que Köpcke a pour la 1re fois articulé des voûtes.

27. — Projet et Entreprise : MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

28. — C'est parce qu'on a observé des fissures au décintrement, qu'on a articulé, depuis, la plupart des grandes voûtes du Wurtemberg.

29. — Projet et Entreprise : MM. Sager et Woerner, de Munich.

§ 3. — *QUELLES VOÛTES CONVIENT-IL D'ARTICULER ?*

Art. 1. — Voûtes sur appui invariable.

A. - En maçonnerie appareillée : pas d'articulations. — Soit à construire une voûte sur un appui rigoureusement invariable, par exemple sur du rocher.

Dans la construction, on préviendra les fissures sur cintre en y ménageant des vides aux bonnes places; les fissures au décintrement, en matant énergiquement les joints vides et en la laissant longtemps sur cintre.

On n'y a d'ailleurs rien à craindre plus tard des changements de température : on observera, au-dessus des reins, des fentes dans les tympans, le parapet, mais non dans la voûte.

B. - En béton : il est prudent d'articuler au moins les arcs très tendus. Mais, au lieu d'une voûte appareillée, supposons une voûte en béton.

Une voûte en maçonnerie est divisée par ses joints; les efforts, par conséquent les raccourcissements ou allongements, leur sont à peu près normaux : s'il y a fissure, c'est suivant un joint.

Dans un monolithe en béton, les mouvements ne sont ni localisés ni régularisés par l'appareil. Il peut se produire des écrasements, des fissures irrégulières aux angles rentrants, aux changements de forme, — spécialement entre une culée massive et la naissance d'un arc très surbaissé.

On aura évité les fissures sur cintre en construisant par tranches. Mais on n'est pas garanti des fentes au décintrement, aux changements de température.

Sans doute, on a construit sans les articuler de grandes voûtes en béton ; toutefois elles sont récentes, et peu sont très surbaissées [30].

On en a articulé de très grandes [30], les unes peu surbaissées, — ce n'était guère

30. **VOÛTES EN BÉTON** $\geqslant 40^m$

Date	Pont de :	*Pays*	Intrados	Voie portée	Portée	Surbaissement
	1° INARTICULÉES					
1870-73	Pont-sur-Yonne	*France*	E	aq	40m	1/5
1885	Weisenbach	*Allemagne*	Ā		40	1/8
1901-03	Big-Muddy	*Et^s-Unis*	E	Fr	42.67	1/4.67
1903-04	Mehring	*Allemagne*	Ā		46	1/7.45
1905-06	Schweich		Ā			
1904-08	Connecticut Av^e	*Et^s-Unis*	C		45.72	1/2
1906	Guggersbach	*Suisse*	Â		50.20	1/6.11
1906-08	Walnut-Lane	*Et^s-Unis*	ÂÂ	rte	70.71	1/3.32
1907-08	Trittenheim	*Allemagne*	Ā		46	1/7.45
1908-09	Edmondson Av^e	*Et^s-Unis*	E		42.37	1/3.17
1908-10	Rocky River		ÂÂ		85.34	1/3.46
1909-11	Longuich	*Allemagne*	Ā		46 43	1/7.45 1/8.05
	2° ARTICULÉES					
1893	Munderkingen	*Allemagne*			59	1/10
1895	Inzigkofen		Ā	rte	47.90	1/9.81
1895-96	Coulouvrenière	*Suisse*			40	1/7.41

Date	Pont de :	*Pays*	Intrados	Voie portée	Portée	Surbaissement
	2° ARTICULÉES *(Suite)*					
1898-1900	Chemnitz		E	Fr	43m10	»
1899-1900	Neckarhausen				59.40	1/11
1899-1900	Grasdorf				40	1/8.88
1899-1901	Malling		Ā	rte	40	1/8.56
1901-03	Hochberg				40	1/7.41
1902-03	Reichenbach				44	1/10
1903-04	Illerbeuren	Allemagne	Ā	Fr	59	1/5.82
1903-05	Neckargartach				40	1/9.14
1904-05	Wallstrasse				65.45	1/5.48
1904-05	Wittelsbach		Ā	rte	44	1/10
1904-05	Moulins-l.-Metz				44 40	1/7.72 1/8.37
1905-08	Mannheim				59.50	1/10.56
1906	Kempten		Â	Fr	64.50	1/2.34
1906-07	Elise		Ā	rte	47.50	1/9.88
1907-08	Garching		E	Fr	44.35	1/3.32
1911-12	Gräveneck		Â	rte	48	1/6.24

nécessaire, — les autres très surbaissées : pour celles-ci, grandes ou petites, à peine de fissures graves, il le fallait.

Art. 2. — Voûtes sur appui qui peut céder : articuler au moins les très surbaissées.

— La grande voûte peut être imposée par motif d'aspect, sur terrain un peu compressible [31, 32] : d'ailleurs, il y a quelquefois des surprises en fondation.

On peut être forcé d'appuyer contre une haute pile-culée, qui se courbera sous la poussée, les voûtes d'accès à une travée métallique [33], de jeter une voûte plate d'élégissement entre deux grandes voûtes, qui oscilleront sous les variations de température [34].

Dans tous les cas où les appuis de la voûte peuvent reculer, s'enfoncer inégalement, il convient vraiment d'articuler.

Une voûte articulée est souple, flexible : il n'est plus nécessaire de l'appareiller : le béton y suffit.

Art. 3. — Réserves sur la durée des articulations métalliques.

Les premières grandes voûtes articulées (à partir de 1885) ne l'étaient qu'au poids mort : on condamnait les articulations avant l'ouverture à la circulation, ce qui préservait de la rouille les rotules en fonte, en acier.

C'est seulement de 1895 que datent les premières grandes voûtes articulées de façon permanente.

Il y a donc encore lieu de faire toutes réserves sur la durée et le fonctionnement de tout système d'articulation, — sur la conservation d'articulations métalliques qu'il est très difficile d'entretenir, impossible de remplacer.

31. — Ponts sur pilotis de Vizille, Tome I, p. 93 ; de Turin, Tome III, p. 199.

32. — Pont de Chester, Tome III, p. 29.

33. — Viaduc métallique de Kubel sur la Sitter. — Arches d'accès de 25^m butant contre une pile-culée de 87^m de hauteur. — On les a articulées (Tableau synoptique, Tome IV, p. 266).

34. — Au pont des Amidonniers, Tome I, p. 193, avant d'être chargées de la dalle en béton armé, les voûtes d'élégissement en ellipse de 11^{m}60 et de 10^{m}10 au 1/4 s'ouvraient :

	à la clef	aux retombées
en été........	à l'extrados	à l'intrados
en hiver.....	à l'intrados	à l'extrados

Elles s'étaient articulées elles-mêmes.

PONTS DÉCRITS DANS LE TOME IV

INDEX ALPHABÉTIQUE

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME IV

TITRE III. — TYPES D'ARTICULATIONS *(Suite)*

CHAPITRE II. — ARTICULATIONS ROULANTES

CHAPITRE III. — ARTICULATIONS TOURNANTES

TITRE IV. — HISTORIQUE.

ARTICULER LES VOUTES EST UNE IDÉE FRANÇAISE

TITRE V. — CLASSEMENT DES VOÛTES ARTICULÉES

LIVRE II. - DESCRIPTION DES PONTS QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES ARTICULÉES DE 40^m ET PLUS DE PORTÉE. TABLEAUX SYNOPTIQUES. — MONOGRAPHIES.

1° — VOÛTES SEMI-ARTICULÉES

ARTICULATIONS SUR PLOMB

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS SUR PLOMB

ARCS TRÈS SURBAISSÉS *(Suite)*

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A¹ r^te (⩾ 40m) *(Suite)*

ARTICULATIONS A GENOU

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A¹ r^te (⩾ 40m)

VOÛTES SEMI-ARTICULÉES ARTICULATIONS A GENOU

ARCS TRÈS SURBAISSÉS (*Suite*)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\overset{\frown}{\underset{\leftrightarrow}{A}}{}^{1}$ F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overset{\frown}{\underset{\leftrightarrow}{A}}{}^{n}$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)

2° -- VOÛTES ARTICULÉES *(DE FAÇON PERMANENTE)*

ARTICULATIONS SUR PLOMB

ELLIPSES

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE E^n F^r ($\geqslant$ 40m)

ARTICULATIONS ROULANTES

ELLIPSES

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE E^n F^r ($\geqslant$ 40m)

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES *(Suite)*

ARCS PEU SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{A}^1$ F^r (⩾ 40^m)

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\hat{A}^1$ r^{te} (⩾ 40^m)

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS *(Suite)*

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

VOÛTES ARTICULÉES — ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS (*Suite*)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\hat{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS (*Suite*)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE A^n r^{te} ($\geqslant 40^m$) (*Suite*)

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS *(Suite)*

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\hat{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS ROULANTES *(Suite)*

ARCS ASSEZ SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â[1] r[te] (⩾ 40m)

ARTICULATIONS TOURNANTES

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â[1] r[te] (⩾ 40m)

VOÛTES ARTICULÉES ARTICULATIONS TOURNANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS (Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\mathbf{A}^1$ r.te (⩾ 40m) (Suite)

VOUTE ARTICULÉE > 40m EN BÉTON PEU ARMÉ

QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉE AU LIVRE II

LIVRE III. - CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES ARTICULÉES

TITRE I - DISPOSITIONS - DIMENSIONS. AVANTAGES - INCONVÉNIENTS DE CHAQUE TYPE D'ARTICULATION

CHAPITRE I. - ARTICULATIONS SUR PLOMB

CHAPITRE II. — ARTICULATIONS ROULANTES

CHAPITRE III. — ARTICULATIONS TOURNANTES

Balanciers tournant autour d'un tourillon

CHAPITRE IV. — ARTICULATIONS A GENOU

Employées seulement comme articulations provisoires, puis condamnées.

Rotules d'acier prises dans des caissons en tôle.

CHAPITRE V. — DISPOSITIONS DES ARTICULATIONS DANS LES PONTS BIAIS 272

TITRE II. — QUELQUES DIMENSIONS ET DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VOÛTES ARTICULÉES

TITRE III. — QUELQUES ÉLÉMENTS DE COMPARAISON ENTRE LES VOÛTES INARTICULÉES ET ARTICULÉES

TITRE IV. — QUELLES VOÛTES FAUT-IL ARTICULER ?

ERRATA

DU TOME IV

Page 143, Monographie **A**^{1} r^{te} ($\geqslant 40^{m})^{3}$, — Titre, — 1re ligne :

au lieu de : *BAVIÈRE*, lire *WURTEMBERG*.

Voir aussi l'**Errata général,** à la fin du Tome V.

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR À L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

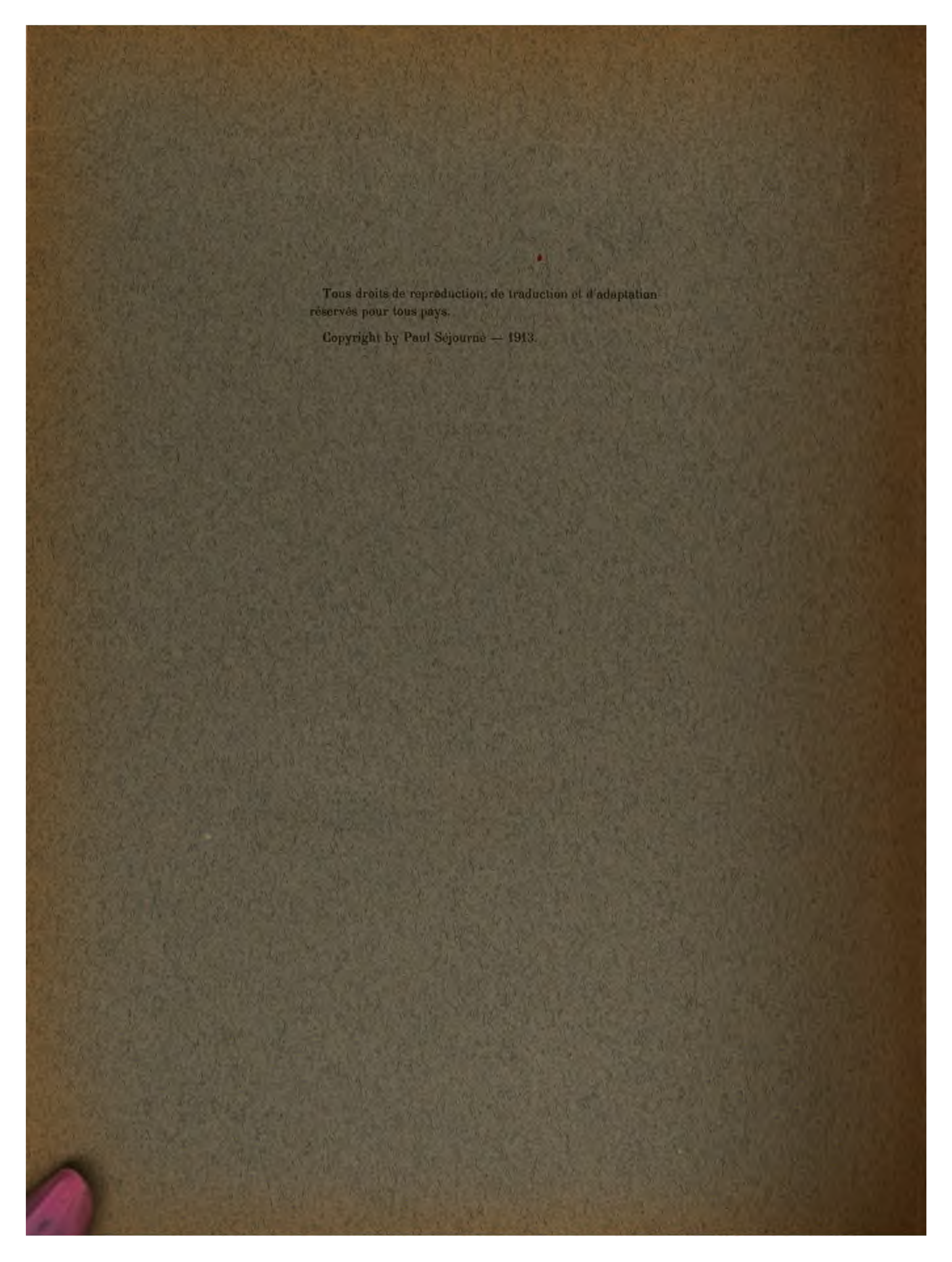
TOME IV

2me PARTIE — VOÛTES ARTICULÉES

BOURGES
IMPRIMERIE V^VE TARDY-PIGELET ET FILS
15, RUE JOYEUSE, 15

—

1913




89078557634
B89078557634A